

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**PSEUDO-DIFERENČNÍ KMITOČTOVÉ FILTRY  
FRAKTÁLNÍHO ŘÁDU**

PSEUDO-DIFFERENTIAL FRACTAL-ORDER FREQUENCY FILTERS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Mohamad Alkanan

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Sládok

BRNO 2021

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

**Student:** Mohamad Alkanan

**ID:** 189753

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Pseudo-diferenční kmitočtové filtry fraktálního řádu

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je prostudování teorie pseudo-diferenčních kmitočtových filtrů, dále teorie o filtrech neceločíselného řádu. Na základě získaných informací navrhnete alespoň jednu novou strukturu. Zapojení vhodně analyzujte a matematicky navrhnete. Optimalizovaný pseudo-diferenční kmitočtový filtr fraktálního řádu sestojte a podrobte experimentálnímu měření. Získané výsledky porovnejte se simulacemi.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] G. Tsirimokou, A. Kartci, J. Koton, N. Herencsar, and C. Psychalinos, "Comparative study of discrete component realizations of fractional-order capacitor and inductor active emulators", *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 27, no. 11, pp. 1–26, 2018. DOI: 10.1142/S0218126618501700.

[2] J. Koton, N. Herencsar, O. Sladok, J. Horng. Pseudo-differential second order band reject filter using current conveyors. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 70, no. 6, pp. 814-821, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeue.2016.03.009>

**Termín zadání:** 1.2.2021

**Termín odevzdání:** 31.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Ondřej Sládok

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá pseudo-diferenčními kmitočtovými filtry fraktálního řádu. Jedná se o návrh neceločíselného řádu  $(1+\alpha)$  pseudo-diferenčního filtru. V úvodu teorie jsou popsány základní vlastnosti kmitočtových filtrů, jejich typ a využití. Dále následuje popis pseudo-diferenčních a diferenčních filtrů. Další část textu je věnována filtrům neceločíselného řádu. Následuje popis použitých proudových konvektorů (UCC, DVCC a DDCC). Další část práce je věnována návrhu, kterým je pseudo-diferenční kmitočtový filtr fraktálního řádu  $(1+\alpha)$  a jeho následný matematický popis v programu SNAP. Funkčnost a správné chování filtru byly ověřeny simulacemi v programu OrCAD. Poslední část práce je věnována praktickým měřením toho filtru.

## Klíčová slova

Fraktální řád, kmitočtový filtr, dolní propust (DP), horní propust (HP), pásmová propust (PP), pásmová zádrž (PŽ), fázovací článek (FČ), UCC, DDCC, DVCC.

## Abstract

This bachelor's thesis deals with pseudo-differential frequency filters of fractal order. It is a proposal of non-integer order  $(1 + \alpha)$  of pseudo-difference filter. The introduction to the theory describes the basic properties of frequency filters, their type and use. The following is a description of pseudo-differential and differential filters. The next part of the text is devoted to filters of non-integer order. Then there is a description of the current conveyors used (UCC, DVCC and DDCC). The next part of the work is devoted to the design, which is a pseudo-differential frequency filter of fractal order  $(1 + \alpha)$  and its subsequent mathematical description in the SNAP program. The functionality and correct behavior of the filter were verified by simulations in OrCAD. The last part of the work is devoted to the practical measurement of the filter.

## Keywords

Fractal order, frequency filter, low pass (LP), high pass (HP), band pass (BP), band reject (BR), all pass (AP), UCC, DDCC, DVCC.

## **Bibliografická citace:**

ALKANAN, Mohamad. *Pseudo-diferenční kmitočtové filtry fraktálního řádu* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133380>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Sládok.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Mohamad Alkanan*

**VUT ID studenta:** *189753*

**Typ práce:** *Bakalářská práce*

**Akademický rok:** *2020/21*

**Téma závěrečné práce:** *Pseudo-diferenční kmitočtové filtry fraktálního řádu*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **31.května 2021**

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářský práce Ing. Ondřeji Sládokovi, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářský práce.

V Brně dne: **31.května 2021**

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>1. KMITOČTOVÉ FILTRY .....</b>	<b>13</b>
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ FILTRŮ .....	13
1.2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI KMITOČTOVÝCH FILTRŮ A JEJICH VYUŽITÍ.....	13
1.2.1 Filtr dolní propust.....	13
1.2.2 Filtr horní propust .....	14
1.2.3 Filtr pásmová propust.....	14
1.2.4 Filtr pásmová zádrž .....	14
1.2.5 Filtr fázovací členek .....	15
1.3 PSEUDO-DIFERENČNÍ A DIFERENČNÍ KMITOČTOVÉ FILTRY .....	15
1.4 KMITOČTOVÉ FILTRY FRAKTÁLNÍHO ŘÁDU .....	17
<b>2. AKTIVNÍ PROUDOVÉ PRVKY .....</b>	<b>18</b>
2.1 UNIVERZÁLNÍ PROUDOVÝ KONVEJOR (UCC) .....	18
2.2 DIFERENČNÍ ROZDÍLOVÝ PROUDOVÝ KONVEJOR (DDCC).....	19
2.3 DIFERENČNÍ PROUDOVÝ KONVEJOR (DVCC) .....	19
<b>3. NÁVRH PSEUDO-DIFERENČNÍ KMITOČTOVÉ FILTRY FRAKTÁLNÍHO ŘÁDU .....</b>	<b>21</b>
3.1 VÝPOČET KOEFICIENTŮ $K_1$ , $K_2$ , $K_3$ , REZISTORŮ $R_1$ , $R_2$ A $C_A$ . ....	22
3.2 SIMULACE .....	23
<b>4. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A SIMULACE .....</b>	<b>25</b>
4.1 MĚŘENÍ A SIMULACE PSEUDO-KAPACITANCE $C_A$ (FOE).....	26
4.2 MĚŘENÍ A SIMULACE PSEUDO-DIFERENČNÍHO FILTRU FRAKTÁLNÍHO ŘÁDU .....	28
4.3 CHOVÁNÍ PSEUDO-DIFERENČNÍHO FILTRU FRAKTÁLNÍHO ŘÁDU PŘI ZMĚNĚ NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ. ....	30
4.4 CMRR (COMMON MODE REJECTION RATIO).....	32
4.5 THD - CELKOVÉ HARMONICKÉ ZKRESLENÍ .....	33
<b>5. ZÁVĚR.....</b>	<b>35</b>



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

DP	Dolní propust (Low-Pass)
HP	Horní propust (High-Pass)
PP	Pásmová propust (Band-Pass)
PZ	Pásmová zádrž (Band-Reject)
FČ	Fázovací článek (All-Pass)
K(p)	Přenosová funkce
$\omega_0$	Úhlová frekvence [ $s^{-1}$ ]
Q	Činitel jakosti [-]
P	Laplaceův operátor
CCII	Proudový konvektor druhé generace
UCC	Univerzální proudový konvektor (universal current conveyor)
DVCC	Diferenční proudový konvektor (differential current voltage conveyor)
DDCC	Diferenční rozdílový proudový konvektor (differential difference current)
Y	Vstupní svorka konvektoru
X	Vstupní svorka konvektoru
Z <sub>+</sub>	Výstupní svorka konvektoru
Z <sub>-</sub>	Výstupní svorka konvektoru
I <sub>1</sub>	Proud na vstupu [A]
I <sub>2</sub>	Proud na výstupu [A]
I <sub>x</sub>	Proud na uzlu X [A]
I <sub>y</sub>	Proud na uzlu Y [A]
I <sub>z</sub>	Proud na uzlu Z [A]
U <sub>x</sub>	Napětí na uzlu X [V]
U <sub>y</sub>	Napětí na uzlu Y [V]
U <sub>z</sub>	Napětí na uzlu Z [V]
R	Rezistor [ $\Omega$ ]
C	Kondenzátor [F]
f <sub>0</sub>	Mezní kmitočet [Hz]
C $\alpha$	Pseudo-kapacitance [ $F/s^{1-\alpha}$ ]
$\alpha$	Alfa
dB	Decibel
Z	Impedance [ $\Omega$ ]
K	Koeficient
CMRR	Common-mode rejection ratio
U <sub>1</sub>	Vstupní napětí [V]
U <sub>1d</sub>	Diferenční vstupní napětí [V]
U <sub>2</sub>	Výstupní napětí [V]
U <sub>2d</sub>	Diferenční výstupní napětí [V]
THD	Total harmonic distortion
$\pi$	Ludolfovo číslo (3,1415926535 [-])
V <sub>in</sub>	Vstupní napětí [V]
V <sub>out</sub>	Výstupní napětí [V]

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Ideální filtr typu dolní propust 1. řádu .....	14
Obr. 2: Ideální filtr typu horní propust 1. řádu .....	14
Obr. 3: Ideální filtr typu pásmová propust 1. řádu .....	14
Obr. 4: Ideální filtr typu pásmová zádrž 1. řádu .....	15
Obr. 5: Ideální filtr typu fázovací člunek 1. řádu .....	15
Obr. 6: Schéma zapojení pseudo-diferenčního filtru .....	16
Obr. 7: Schéma zapojení plně-diferenčního filtru .....	16
Obr. 8: Schématická značka UCC .....	18
Obr. 9: Vnitřní zapojení konveje třetí úrovně (UCC-3L) .....	18
Obr. 10: Realizace DDCC pomocí UCC .....	19
Obr. 11: Realizace DVCC pomocí UCC .....	20
Obr. 12: Pseudo-diferenční filtr fraktálního řádu .....	21
Obr. 13: Struktura pseudo-kapacitance (FOE) .....	21
Obr. 14: Blokové schéma zapojení .....	25
Obr. 15: zapojení při měření v laboratoři .....	26
Obr. 16: Modulová charakteristika sítě RC (FOE) pro tři hodnoty $\alpha$ , simulace (čárkovaně), měření (plná čára) .....	27
Obr. 17: Fázová charakteristika sítě RC (FOE) pro tři hodnoty $\alpha$ , simulace (čárkovaně), měření (plná čára) .....	28
Obr. 18: Modulová charakteristika pseudo-diferenčního filtru fraktálního řádu pro tři hodnoty $\alpha$ , teorie (tečkovaně), simulace (čárkovaně), měření (plná čára) .....	29
Obr. 19: Fázová charakteristika pseudo-diferenčního filtru fraktálního řádu pro tři hodnoty $\alpha$ , teorie (tečkovaně), simulace (čárkovaně), měření (plná čára) .....	30
Obr. 20: Modulová charakteristika pseudo-diferenčního filtru fraktálního řádu při snížení napájecího napětí o 9 %, při 1.5 V (čárkovaně), při 1.65 V (plná čára) .....	31
Obr. 21: Fázová charakteristika pseudo-diferenčního filtru fraktálního řádu při snížení napájecího napětí o 9 %, při 1.5 V (čárkovaně), při 1.65 V (plná čára) .....	31
Obr. 22: Potlačení souhlasného signálu .....	32
Obr. 23: Potlačení souhlasného signálu při snížení napájecího napětí o 9% .....	33
Obr. 24: Harmonické zkreslení filtru pro tři hodnoty $\alpha$ a při napájení napětím $\pm 1.65$ V .....	34
Obr. 25: Zapojení pseudo-diferenční kmitočtový filtr fraktálního řádu .....	40
Obr. 26: Návrh desky plošných spojů (cesty) ze shora .....	41
Obr. 27: Návrh desky plošných spojů (cesty) ze zdola .....	42
Obr. 28: Návrh desky plošných spojů (součástky) .....	42
Obr. 29: Návrh desky plošných spojů cesty a součástky ze shora a zdola .....	43
Obr. 30: Fotografie pseudodiferenčního filtru fraktální řád pohled ze shora .....	43
Obr. 31: Fotografie pseudo-diferenčního filtru fraktální řád pohled ze zdola .....	44
Obr. 32: Zapojení pseudo-kapacitance $C_\alpha$ .....	45
Obr. 33: Návrh desky plošných spojů (cesty) ze shora .....	47
Obr. 34: Návrh desky plošných spojů (cesty) ze zdola .....	47
Obr. 35: Fotografie pseudo-kapacitance $C_\alpha$ .....	47
Obr. 36: Originální výsledek pseudo-diferenční filtr fraktální řád pro $\alpha = 0.4$ .....	48
Obr. 37: Originální výsledek pseudo-diferenční filtr fraktální řád pro $\alpha = 0.6$ .....	48
Obr. 38: Originální výsledek pseudo-diferenční filtr fraktální řád pro $\alpha = 0.8$ .....	48
Obr. 39: Originální výsledek pseudo-kapacitance ( $C_\alpha$ ) pro $\alpha = 0.4$ .....	49
Obr. 40: Originální výsledek pseudo-kapacitance ( $C_\alpha$ ) pro $\alpha = 0.6$ .....	49

Obr. 41: Originální výsledek pseudo-kapacitance ( $C\alpha$ ) pro $\alpha = 0.8$ .....	50
Obr. 42: Originální výsledek CMRR pro $\alpha = 0.4$ při napájecí napětí 1.65 V .....	50
Obr. 43: Originální výsledek CMRR pro $\alpha = 0.6$ při napájecí napětí 1.65 V .....	50
Obr. 44: Originální výsledek CMRR pro $\alpha = 0.8$ při napájecí napětí 1.65 V .....	51

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Hodnoty $k_2$ , $k_3$ , $R_1$ , $R_2$ a $C_a$ pro tři hodnoty $\alpha$ .....	23
Tab. 2: Hodnoty jednotlivých rezistorů a kondenzátorů sítě RC (FOE) pro tři hodnoty $\alpha$ .....	24
Tab. 3: použité hodnoty při měření FOE pro tři hodnoty $\alpha$ .....	26

# ÚVOD

Tato práce se zabývá pseudo-diferenčními kmitočtovými filtry fraktálního řádu. Cílem práce je analyzovat teoretické vlastnosti a způsoby navrhování filtru fraktálního řádu. Kmitočtová filtrace signálu je jedním ze základních způsobů zpracování signálu. Proto se v současnost kmitočtové filtry využívají v elektronice. Takové filtry lze realizovat užitím pasivních součástek (rezistor, kapacitor a induktor), ale je vhodné používat aktivních filtrů, kde jsou použity aktivní prvky (UCC, DDCC, DVCC, CCII, ...) společně s rezistory a kondenzátory. Fraktální obvody jsou obvody, které realizují filtry neceločíselného řádu, např.  $1+\alpha$ , kde hodnota  $\alpha$  je v rozsahu ( $0 < \alpha < 1$ ). Kmitočtové filtry lze nalézt v elektronice, elektrotechnice a radiotechnice.

V první části je věnována teorii, popisuje kmitočtové filtry a jejich základní rozdělení podle vlastností a zpracování signálu, filtry typu dolní, horní a pásmový propust, pásmová zadrž a fázovací články. Dále obsahuje popis diferenčních filtrů a strukturu fraktálního řádu.

Ve druhé části je popsáno použití aktivních proudových konvektorů univerzální proudový konvektor (UCC), diferenční rozdílový proudový konvektor (DDCC) a diferenční proudový konvektor (DVCC), jejich schéma zapojení a rovnice, které popisují mezi jednotlivými branami (vstupy a výstupy).

Třetí část je věnována realizaci vlastního návrhu Pseudo-diferenčního kmitočtového filtru fraktálního řádu. Při navrhování v programu SNAP, byly použity dva konvektory typu UCC a čtyři pasivní prvky. Z tohoto zapojení vznikl filtr typu dolní propusti. Jedním z pasivních prvků je pseudo-kapacitance  $C\alpha$ , kde je použita síť RC 7. řádu typu Foster II. Návrh byl simulován v programu OrCAD, pro charakteristický kmitočet 100 kHz a řády filtru 1.4, 1.6 a 1.8.

V poslední části této práce je popsáno experimentální měření pro pseudo-diferenční kmitočtový filtr fraktálního řádu a pseudo-kapacitance  $C\alpha$  (FOE). Výsledky byly porovnány se simulacemi a teoretickými analýzami pro  $\alpha = 0.4$ ,  $\alpha = 0.6$  a  $\alpha = 0.8$ . Dále je uvedeno popis chování obvodů při změně napájecího napětí a provedeno měření parametru CMRR a celkové harmonické zkreslení THD pro tři hodnoty  $\alpha$ .

Tato práce obsahuje na konci přílohy pro navrhované desky plošných spojů obvodu v programu Eagle, použité součástky, fotografii zapojení obvodu v laboratoři a originální výsledky z měření.

# 1. KMITOČTOVÉ FILTRY

Kmitočtové filtry jsou lineární elektrické obvody. S kmitočtovými filtry se můžeme setkat v různých oblastech elektrotechniky a elektroniky [1].

Kmitočtové filtry patří mezi základní stavební bloky pro zpracování přijímaných signálů. Jejich úkolem je výběr kmitočtových složek procházejícího signálu dle jejich kmitočtu.

Filtry obvykle propouštějí kmitočtové složky bez útlumu (oblast propustného pásma), jiné filtry kmitočtové složky potlačují (oblast nepropustného pásma).

Tyto vlastnosti se vyjadřují pomocí modulové (amplitudové) kmitočtové charakteristiky, což je závislost modulu napětí na kmitočtu.

Obecně rozlišujeme mezi aktivními a pasivními obvodovými strukturami. Nejvíce jsou kmitočtové filtry realizovány pomocí pasivních součástek. v těchto filtrech jsou využívány rezistory, kondenzátory a indukty. Tyto součástky jsou levnou a dostupnou variantou a jejich výhodou je jednoduchost [2]. Pro lepší vypracovávání signálu bez ztráty, je vhodné používat aktivních filtrů, které se zakládají pouze s rezistory, kondenzátory a aktivními prvky (UCC, DDCC, DVCC, CCII, ...).

## 1.1 Základní rozdělení filtrů

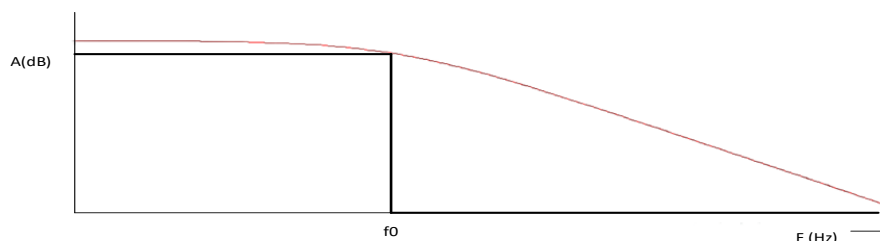
Kmitočtové filtry můžeme dělit, podle jejich elektronických vlastností a použití součástek, na filtry pasivní nebo aktivní. Dále podle toho, jak zpracovávají signál na filtry pseudo-diferenční (diferenční) a nediferenční, a podle toho, jaká je jejich propustnost, na filtry selektivní.

## 1.2 Základní vlastnosti kmitočtových filtrů a jejich využití

Jednotlivé filtry pasivní i aktivní dělíme podle toho, jak propouští, či nepropouští pásmo signálu, na dolní propust [DP], horní propust [HP], pásmová propust [PP], pásmová zádrž [PZ], fázovací článek [FČ]. Každý z jednotlivých filtrů má charakteristický kmitočet označovaný  $f_0$ , od tohoto kmitočtu, filtr začíná propouštět signál, potlačovat signál, nebo vybírat.

### 1.2.1 Filtr dolní propust

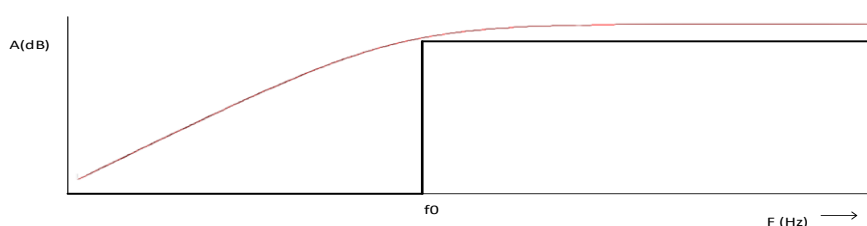
Je filtr, který propouští složky signálu s kmitočty nižšími než mezní kmitočet  $f_0$  [1], kdy modulová charakteristika signálu poklesne o 3 dB a vyšší signály potlačuje. Filtr se používá především v audio technice. Filtr DP lze vidět na Obr. 1.



Obr. 1: Ideální filtr typu dolní propust 1. řádu

### 1.2.2 Filtr horní propust

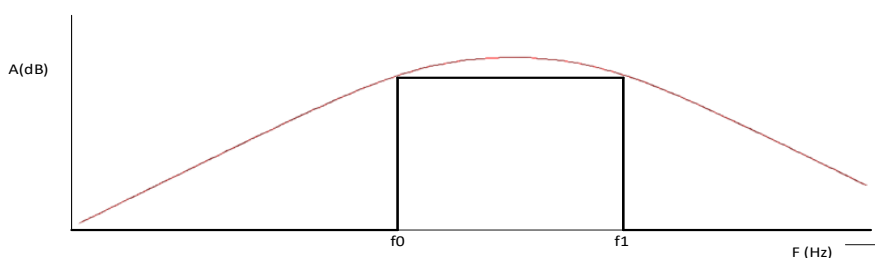
Je filtr, který propouští složky signálu o kmitočtech vyšších, než je mezní kmitočet  $f_0$  [1] a nižší složky potlačuje. Filtr se využívá v audio technice. filtr HP lze vidět na Obr. 2.



Obr. 2: Ideální filtr typu horní propust 1. řádu

### 1.2.3 Filtr pásmová propust

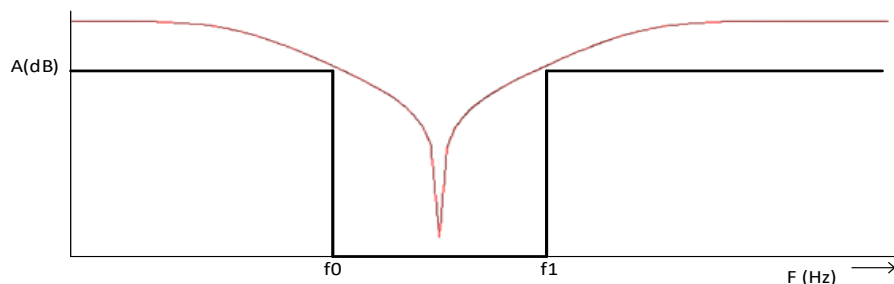
Je filtr, který propouští všechny nižší kmitočty (dolní propust) a všechny vyšší kmitočty (horní propust). Propouští pouze pásmo určené dvěma mezními frekvencemi  $f_0$  a  $f_1$ , jak je uvedeno na Obr. 3. tyto filtry se používají v bezdrátových vysílačích a přijímačích. [1]



Obr. 3: Ideální filtr typu pásmová propust 1. řádu

### 1.2.4 Filtr pásmová zadrž

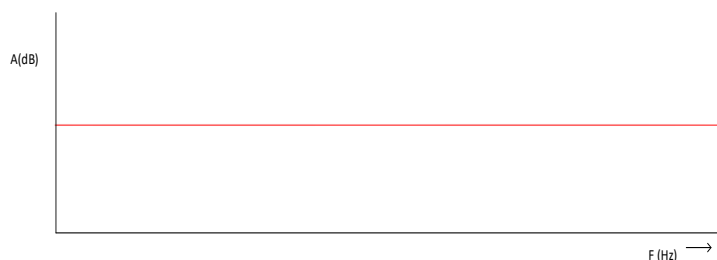
Je filtr, který nepropouští signál [1], jehož kmitočet je mezi horním a dolním mezním kmitočtem. Používají se v audio technice proti nechtěné zpětné vazbě. Obr. 4, popisuje ideální filtr PZ.



Obr. 4: Ideální filtr typu pásmová zádrž 1. řádu

### 1.2.5 Filtr fázovací článek

Filtr, který zpracovává signál a v tomto pásmu frekvencí je stejný zisk. Mění se fázový vztah mezi různými frekvencemi, protože se mění jeho fázový posuv mezi výstupním a vstupním signálem [1][2][3]. Obr. 5, popisuje ideální filtr FČ.



Obr. 5: Ideální filtr typu fázovací článek 1. řádu

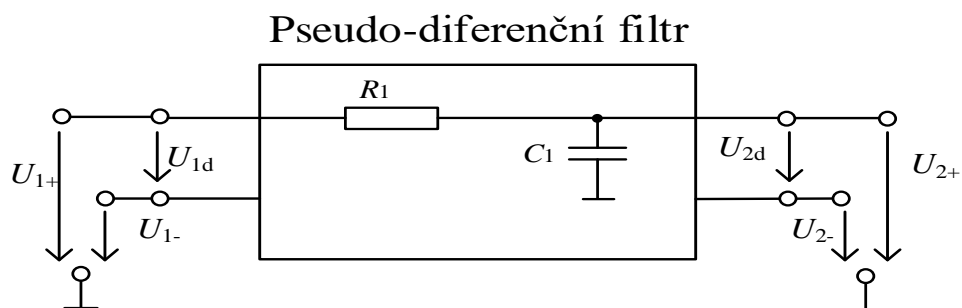
## 1.3 Pseudo-diferenční a diferenční kmitočtové filtry

V analogové technologii stále existuje zájem o frekvenční filtry, které lze nalézt ve velkém počtu elektroniky. Novým typem frekvenčních filtrů jsou pseudo-diferenční kmitočtové filtry. Tyto filtry kombinují vlastnosti plně diferenčních a nediferenčních filtrů. Jedná se o struktury, které mají dva diferenční vstupy a dva diferenční výstupy. Vnitřní struktura zapojení je nediferenční. Jsou méně složité než plně diferenční struktury, které používají více prvků, ale stále mají požadované vlastnosti. V praxi se proto často používají v kombinaci s plně diferenční filtry. Tento způsob zapojení má stále dostatečné potlačení CMRR složky, při méně komplexní struktuře zapojení.[6].

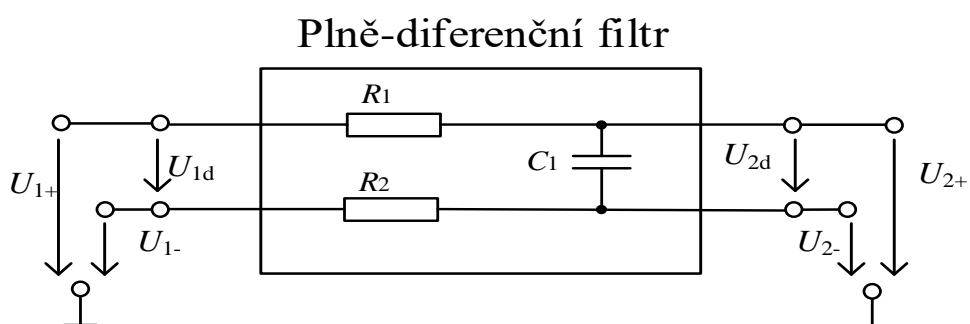
Schéma zapojení pseudo-diferenčního filtru je na Obr. 6.

U diferenčních filtrů je signál přenášen přes dva signálové kanály, což snižuje možnost zkreslení výsledného signálu. Obvod je také uzemněn pomocí jednoho kanálu jako v případě nediferenčním. Diferenční zapojení se vytváří ve většině případů z nediferenčního zapojení pomocí zrcadlení pasivních a aktivních prvků, a proto je nevýhodou diferenčních filtrů, že jsou složitější než nediferenční a potřebují více součástek. [4][5]. Můžeme to vidět na Obr. 7.





Obr. 6: Schéma zapojení pseudo-diferenčního filtru



Obr. 7: Schéma zapojení plně-diferenčního filtru

Následující matematický popis platí pro diferenční vstupní a výstupní signál v napěťovém režimu [1].

$$U_{1d} = U_{1+} - U_{1-}, \quad U_{2d} = U_{2+} - U_{2-}, \quad A_d = \frac{U_{2d}}{U_{1d}} = \frac{U_{2+} - U_{2-}}{U_{1+} - U_{1-}} \quad (1.1)$$

kde signál  $U_{1d}$  je diferenční vstup napětí, a je to rozdíl mezi dvěma vstupními signály  $U_{1+}$ ,  $U_{1-}$ . A signál  $U_{2d}$  je diferenční výstup napětí, a je to rozdíl mezi dvěma výstupními signály  $U_{2+}$ ,  $U_{2-}$ . Napěťový přenos  $A_d$  je podíl výstupního napětí a vstupního napětí. Z tohoto matematického popisu vyplývá, že k analýze takových struktur nám stačí pouze vstupní a výstupní signály a obvod mezi nimi nemusíme vůbec brát v úvahu. Tím pádem může být na vstupu a na výstupu diferenční napětí, tedy dvě rozdílové svorky na vstupu i na výstupu, a zbytek obvodu může být nediferenční, což je definice právě pseudo-diferenčního filtru.

## 1.4 Kmitočtové filtry fraktálního řádu

Obecně se nazývají neceločíselné filtry. V poslední době hojně roste zájem o filtry s fraktálním řádem [7]. Vědce v současnosti velice zajímá toto téma z důvodu, že systémy fraktálního řádu lze nalézt v mnoha vědeckých oborech. Například v elektrotechnice, medicíně, biologii, biochemii a zemědělství [8], [9], [10]. Nejlepší příklady pro využití těchto filtrů jsou oscilátory a měřicí systémy [9], [11]. V oblasti biologie a biochemie se používají k modelování funkce tkání, buněk nebo chování různých organismů [10]. Systémy nečíselného řádu se také používají k měření a analýze biologických signálů, jako například elektrokardiogram (EKG) [10], [12]. V zemědělství lze fraktální systémy použít k aproximaci a měření vlastností ovoce [12].

Tento typ umožňuje nový pohled a další využití těchto struktur. Řád filtru je vždy dán hodnotou mocniny ( $P$ ) na ( $n$ )  $\Rightarrow (P^n)$ . Čím vyšší úroveň, tím má filtr vyšší řád. Pro filtry fraktálního řádu je popsán sklon útlumu jako  $20(n + \alpha)$  dB/dekáda, kde  $n$  je nenulové celé kladné číslo a  $\alpha$  je hodnota v rozsahu ( $0 < \alpha < 1$ ). [8], [13], [15]

V případě návrhu analogového frekvenčního filtru fraktálního řádu se přidává prvek fraktálního řádu (FOE). Tento prvek (FOE) zatím nelze zakoupit jako samostatnou součást, jakými jsou dnešní rezistory nebo jiné součástky. První příklad návrhu FOE je pomocí metody CFE (Continued Fraction Expansions). Podle CFE lze získat druhou aproximaci Laplaceova operátoru ( $p$ ) ve tvaru (1.2). podle [15]

$$p^\alpha \cong \frac{(\alpha^2 + 3\alpha + 2)p^2 + (8 - 2\alpha^2)p + (\alpha^2 - 3\alpha + 2)}{(\alpha^2 - 3\alpha + 2)p^2 + (8 - 2\alpha^2)p + (\alpha^2 + 3\alpha + 2)} \quad (1.2)$$

Neceločíselný řád filtru lze realizovat pouze do  $(n + \alpha) < 2$ . Z toho vyplývá, že můžeme realizovat pouze filtry s neceločíselným řádem  $(1 + \alpha)$ . Tato metoda je nevhodná díky složitosti matematického popisu [13][14]. Druhým možným návrhem FOE je velmi často používaná technologie - síť RC řádu, jakými jsou Foster I, Foster II, Cauer I a Cauer II. V této práci využíváme FOE typu Foster II více Kap.3. Nejčastěji aproximovaný pasivní prvek je kondenzátor fraktálního řádu s impedancí danou rovnicí (1.3).[9], [10], [13].

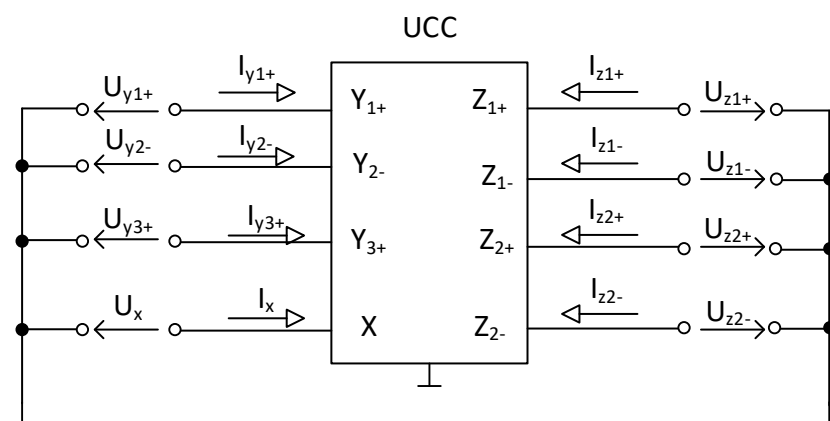
$$Z_c = \frac{1}{\omega^\alpha C_\alpha} \quad (1.3)$$

kde  $C_\alpha$  je pseudo-kapacitance a jeho jednotka je vyjádřena v  $F/s^{1-\alpha}$ .

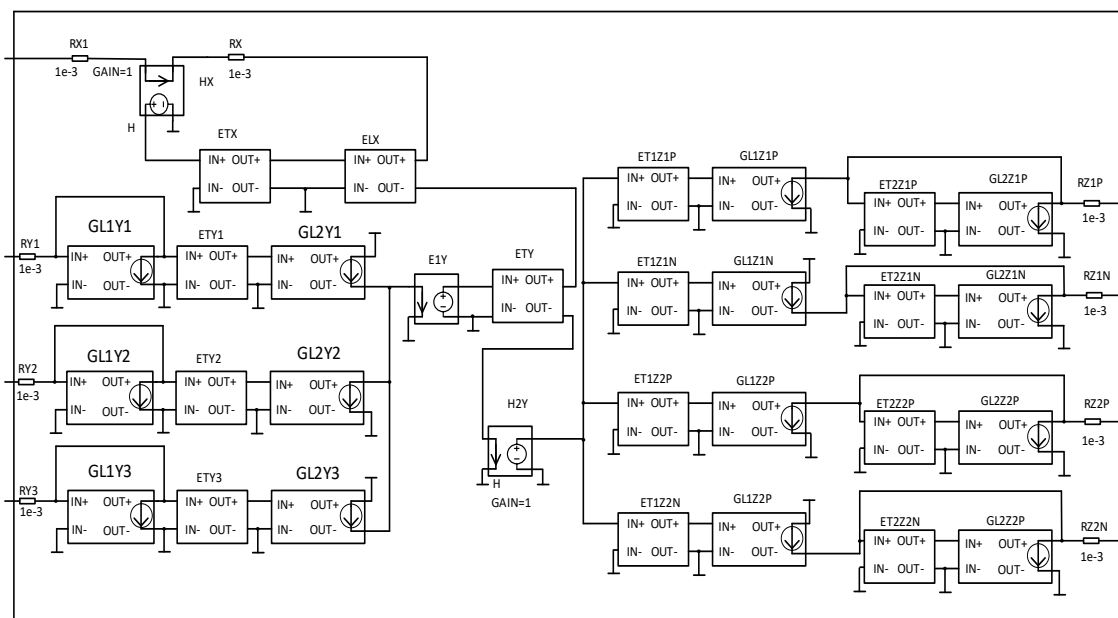
## 2. AKTIVNÍ PROUDOVÉ PRVKY

### 2.1 Univerzální proudový konvektor (UCC)

Jedná se o konvektor s osmi branami, který má tři vysoké vstupy impedančního napětí  $Y_{1+}$ ,  $Y_{2-}$ ,  $Y_{3+}$ , jeden nízko impedanční vstup a čtyři proudové výstupy  $Z_{1+}$ ,  $Z_{1-}$ ,  $Z_{2+}$ ,  $Z_{2-}$ . Jeho schématická značka je na Obr. 8. Struktura vnitřního zapojení konvektoru třetí úrovně (UCC-3L) je na Obr. 9. Pomocí UCC lze realizovat jiné konvektory, jako např. (DVCC, DDCC a CCII), a to tak, že propojíme potřebné svorky a nevyužité svorky uzemníme [16]. A rovnice popisující vztahy mezi jednotlivými branami (2.1) (2.2) (2.3) (2.4). [17]



Obr. 8: Schématická značka UCC



Obr. 9: Vnitřní zapojení konvektoru třetí úrovně (UCC-3L)

$$I_{Z1+} = I_{Z2+} = I_X \quad (2.1)$$

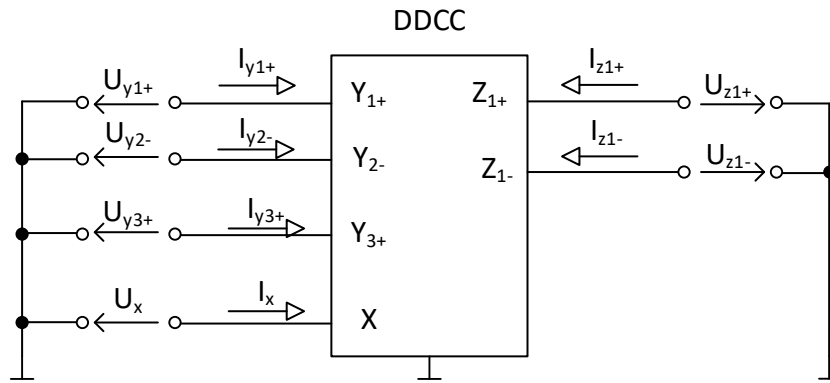
$$I_{Z1-} = I_{Z2-} = -I_X \quad (2.2)$$

$$I_{Y1+} = I_{Y2-} = I_{Y3+} = 0 \quad (2.3)$$

$$U_X = U_{Y1+} - U_{Y2-} + U_{Y3+} \quad (2.4)$$

## 2.2 Diferenční rozdílový proudový konvektor (DDCC)

Jedná se o konvektor s šesti branami, který má tři vysoké vstupy impedančního napětí  $Y_{1+}$ ,  $Y_{2-}$ ,  $Y_{3+}$ , jeden nízko impedanční vstup  $X$  a dva proudové výstupy  $Z_{1+}$ ,  $Z_{1-}$ . Pomocí konvektoru UCC můžeme realizovat konvektor DDCC, když uzemníme  $Z_{2+}$ ,  $Z_{2-}$ , Obr. 10. Vztahy mezi vstupy a výstupy podle (2.5) (2.6) (2.7) (2.8). [2] [18]



Obr. 10: Realizace DDCC pomocí UCC

$$I_{Z1+} = I_X \quad (2.5)$$

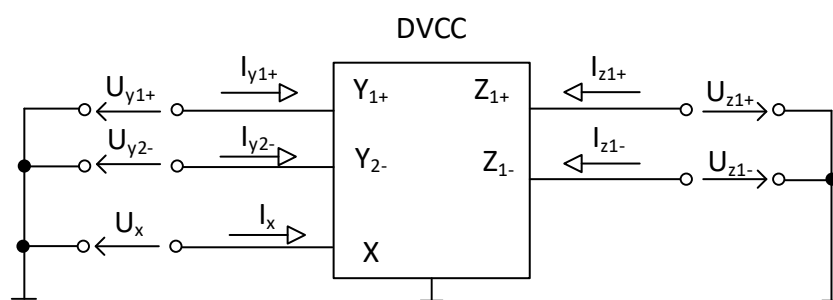
$$I_{Z1-} = -I_X \quad (2.6)$$

$$I_{Y1+} = I_{Y2-} = I_{Y3+} = 0 \quad (2.7)$$

$$U_X = U_{Y1+} - U_{Y2-} + U_{Y3+} \quad (2.8)$$

## 2.3 Diferenční proudový konvektor (DVCC)

Jedná se o konvektor s pěti branami, který má dva vysoké vstupy impedančního napětí  $Y_1$ ,  $Y_2$ . v našem případě to bude  $Y_{1+}$ ,  $Y_{2-}$ , jeden nízko impedanční vstup  $X$  a dva vysoké proudové výstupy  $Z_+$ ,  $Z_-$ , v našem případě to bude  $Z_{1+}$ ,  $Z_{1-}$ . Pomocí konvektoru UCC můžeme realizovat konvektor DVCC, když uzemníme  $Y_{3+}$ ,  $Z_{2+}$ , a  $Z_{2-}$ , Obr. 11. Vztahy mezi jednotlivými branami (2.9) (2.10) (2.11) (2.12). [2] [18]



Obr. 11: Realizace DVCC pomocí UCC

$$I_{Z+} = I_X \quad (2.9)$$

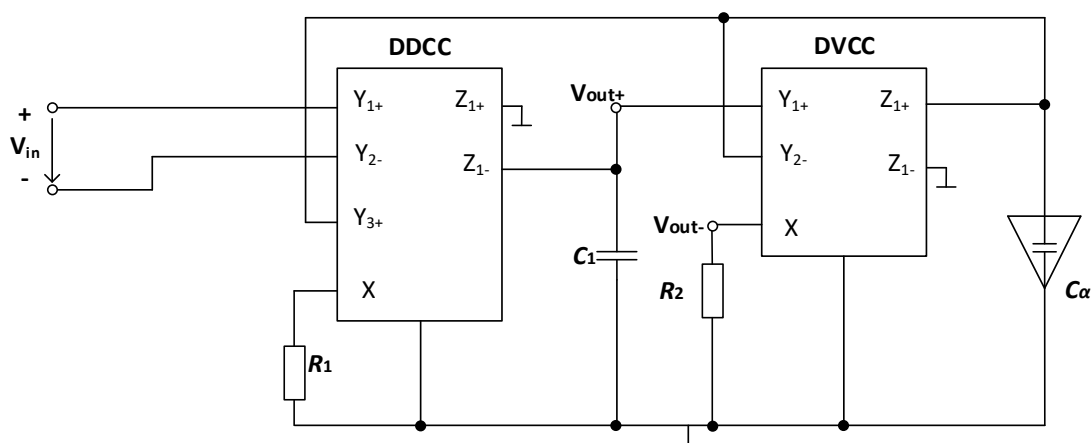
$$I_{Z-} = -I_X \quad (2.10)$$

$$I_{Y1+} = I_{Y2-} = 0 \quad (2.11)$$

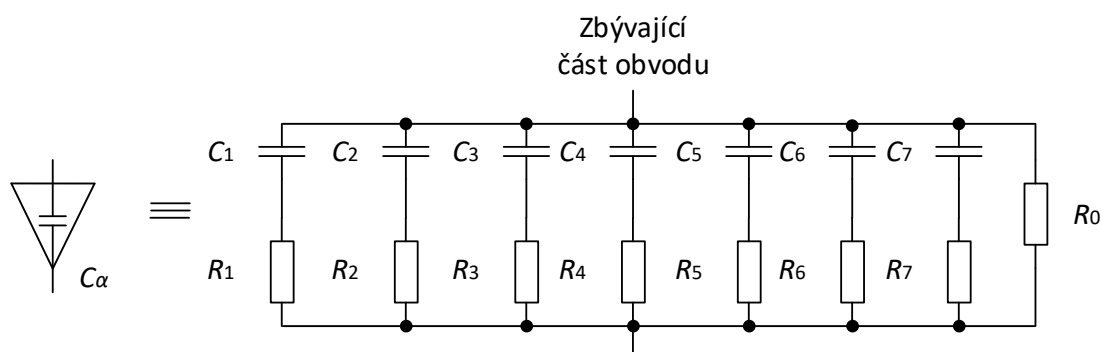
$$U_X = U_{Y1+} - U_{Y2-} \quad (2.12)$$

### 3. NÁVRH PSEUDO-DIFERENČNÍ KMITOČTOVÉ FILTRY FRAKTÁLNÍHO ŘÁDU

Jedná se o nově navržené pseudo-diferenční filtru. Dále byl filtr upraven na fraktální řád podle [19], čímž byl získán pseudo-diferenční filtr fraktálního řádu  $(1+\alpha)$  pracujícího v napět'ovém režimu který je zobrazen na Obr.12. Skládá se z diferenčního rozdílového proudového konveju (DDCC) a diferenčního proudového konveju (DVCC). Filtr dále obsahuje čtyři pasivní prvky, dva rezistory ( $R_1, R_2$ ) a jeden kondenzátor ( $C_1$ ) a pseudo-kapacitanci  $C_\alpha$ . Všechny pasivní prvky jsou uzemněny. Na výstupu se nám objeví filtr typu dolní propust. Pseudo-kapacitance  $C_\alpha$  byla zkonstruována pomocí kapacitního prvku fraktálního řádu (FOE). Jedná se o RC strukturu 7.řádu typu Foster II, kde jsou rezistory a kondenzátory paralelně zapojeny. Tuto strukturu můžeme vidět na Obr. 13.



Obr.12: Pseudo-diferenční filtr fraktálního řádu



Obr. 13: Struktura pseudo-kapacitance (FOE)

### 3.1 Výpočet koeficientů $k_1, k_2, k_3$ , rezistorů $R_1, R_2$ a $C_\alpha$ .

Postup výpočtu koeficientů  $k_1, k_2, k_3$  a  $C_\alpha$  je podle [13]. Po analýze zapojení Obr.12 v programu SNAP, vznikl napěťový přenos pro filtr typu dolní propust:

$$K(p)_{DP} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-1}{p^2(R_1R_2C_1C_2) + p(R_1C_1) + 1} \quad (3.1)$$

K matematickému návrhu jsme využili [13], přenosová funkce fraktálního řádu je dána:

$$K_2^{1+\alpha}(p) = \frac{k_1}{p^{1+\alpha} + pk_2 + k_3} \quad (3.2)$$

Koeficienty  $k_1, k_2$  a  $k_3$  byly formulovány pro požadované hodnoty útlumu  $20(1 + \alpha)$  dB/dec [13], [20] a přinášejí nejmenší chybu propustného pásma. Podle literatury [13], [20], T. J. Freeborn uvádí, že pro simulace a testování používáme programovatelné analogové pole *FPAA*. Simulace v MATLABU jsou experimentálně ověřovány pomocí *FPAA*. Dále uvádí že při optimalizaci *FPAA* dochází k chybám viz [13, obr.3]. Pomocí následujících rovnic získáme hodnoty pro koeficienty  $k_1, k_2$  a  $k_3$ . [8]

$$k_1 = 1 \quad (3.3 \text{ a})$$

$$k_2^{FPAA} = 1,068\alpha^2 + 0,161\alpha + 0,3324 \quad (3.3 \text{ b})$$

$$k_3^{FPAA} = 0,2937\alpha + 0,7122 \quad (3.3 \text{ c})$$

Výpočet je ukázán pro  $\alpha = 0,4$ , z (3.2) je nutné vypočítat koeficienty  $k_1, k_2$  a  $k_3$ . To lze provést pomocí rovnic (3.3):

$$k_1 = 1 \quad (3.5 \text{ a})$$

$$k_2^{FPAA} = 1,068 \cdot 0,4^2 + 0,161 \cdot 0,4 + 0,3324 = 0,56768 \quad (3.5 \text{ b})$$

$$k_3^{FPAA} = 0,2937 \cdot 0,4 + 0,7122 = 0,82968 \quad (3.5 \text{ c})$$

Pomocí [21] a programu MATLAB byla vypočítána hodnota impedance  $Z = 1592,35 \Omega$ , Pro výpočet  $C_\alpha$  zvolíme hodnotu kondenzátoru  $C_1 = 1 \text{ nF}$  a mezní kmitočet  $f_0 = 100 \text{ kHz}$ . Pomocí (1.3):

$$C_\alpha = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 100000)^{0,4} \cdot 1592,35} = 3,01 \cdot 10^{-6} \left[ F / s^{1-\alpha} \right] \quad (3.6)$$

Pro  $\alpha = 0,4$ , máme hodnoty koeficientu  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  a  $C_\alpha$ , máme zvolenou hodnotu kondenzátoru  $C_1 = 1$  nF a mezní kmitočet  $f_0 = 100$  kHz. Zbývá nám spočítat hodnoty rezistorů  $R_1$  a  $R_2$  pro které platí:

$$R_2 = \frac{1}{\omega_0^{1+\alpha} C_\alpha k_2}$$

$$R_2 = 12362,44\Omega \quad (3.7)$$

$$R_1 = \frac{1}{\omega_0 C_1} \frac{k_1}{k_3}$$

$$R_1 = 840,88\Omega \quad (3.8)$$

## 3.2 Simulace

Obvod byl simulován pomocí programu OrCAD. Pro simulaci byly použity tři univerzální proudové konvejory UCC. Prvek byl zapojen tak, aby byl vytvořen DDCC a DVCC, (viz kap. 2). Simulace byla provedena pro ideální prvky UCC-1L a pro reálné prvky UCC-3L. Filtr byl simulován a ověřen pro hodnoty fraktálního řádu  $\alpha = 0.4$ ,  $\alpha = 0.6$  a  $\alpha = 0.8$ . Mezní kmitočet filtru byl zvolen  $f_0 = 100$  kHz, dále byl zvolen kondenzátor  $C_1 = 1$  nF. Rezistory  $R_1$ ,  $R_2$  byly vypočítány podle (3.7 a 3.8) a  $C_\alpha$  dle (3.6) viz Tab.1.

Tab. 1: Hodnoty  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  a  $C_\alpha$  pro tři hodnoty  $\alpha$

$\alpha$	0.4	0.6	0.8
$Z_c$	1592.357	1592.357	1592.357
$k_2$	0.56768	0.81348	1.14472
$k_3$	0.82968	0.88842	0.94716
$R_1 (\Omega)$	1088.96	1457.299	1923.517
$R_2 (\Omega)$	2805.025	1957.463	1391.045
$C_\alpha (F/s^{1-\alpha})$	3.01E-06	2.08E-07	1.44E-08

Pomocí [21] a programu MATLAB, byly získané hodnoty kondenzátorů a odporů RC sítě Foster II. Dále byl zvolen mezní kmitočet  $f_0 = 100$  kHz. Rozsah pro FOE byl zvolen od 1 kHz až 10 MHz. Hodnoty jednotlivých rezistorů a kondenzátorů FOE jsou popsány v Tab. 2. Při simulaci byly získané modulové a fázové charakteristiky pro tři aproximované FOE ( $\alpha = 0.4, 0.6, 0.8$ ) jsou na Obr. 16 a Obr. 17. víc kap.4.1.



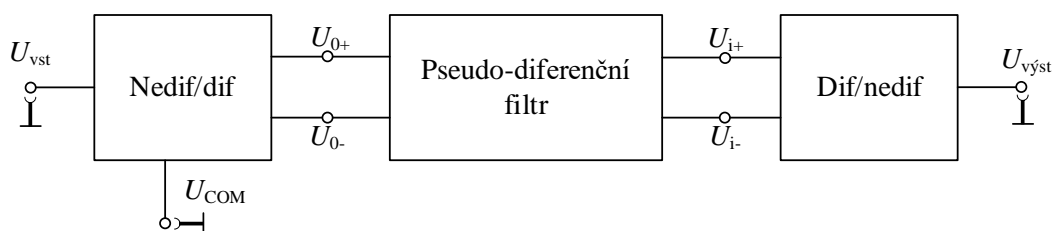
Tab. 2: Hodnoty jednotlivých rezistorů a kondenzátorů sítě RC (FOE) pro tři hodnoty  $\alpha$

$\alpha$	0.4	0.6	0.8
$R_0 (\Omega)$	10047.09	25237.15	79806.88
$R_1 (\Omega)$	514.15	145.01	29.42
$R_2 (\Omega)$	1166.69	571.12	266.66
$R_3 (\Omega)$	2088.11	1388.1	894.02
$R_4 (\Omega)$	3590.98	3139.87	2668.11
$R_5 (\Omega)$	6149.48	7032.97	7818.36
$R_6 (\Omega)$	10749.7	16170.76	23592.62
$R_7 (\Omega)$	20930.93	42757.8	83786.51
$C_1 (\text{pF})$	46	142.87	391.334
$C_2 (\text{PF})$	75.5	135.21	160.951
$C_3 (\text{PF})$	157	207.38	178.952
$C_4 (\text{PF})$	341	341.74	223.514
$C_5 (\text{PF})$	742	568.72	284.33
$C_6 (\text{PF})$	1580	922.02	351.229
$C_7 (\text{PF})$	3030	1299.8	368.656

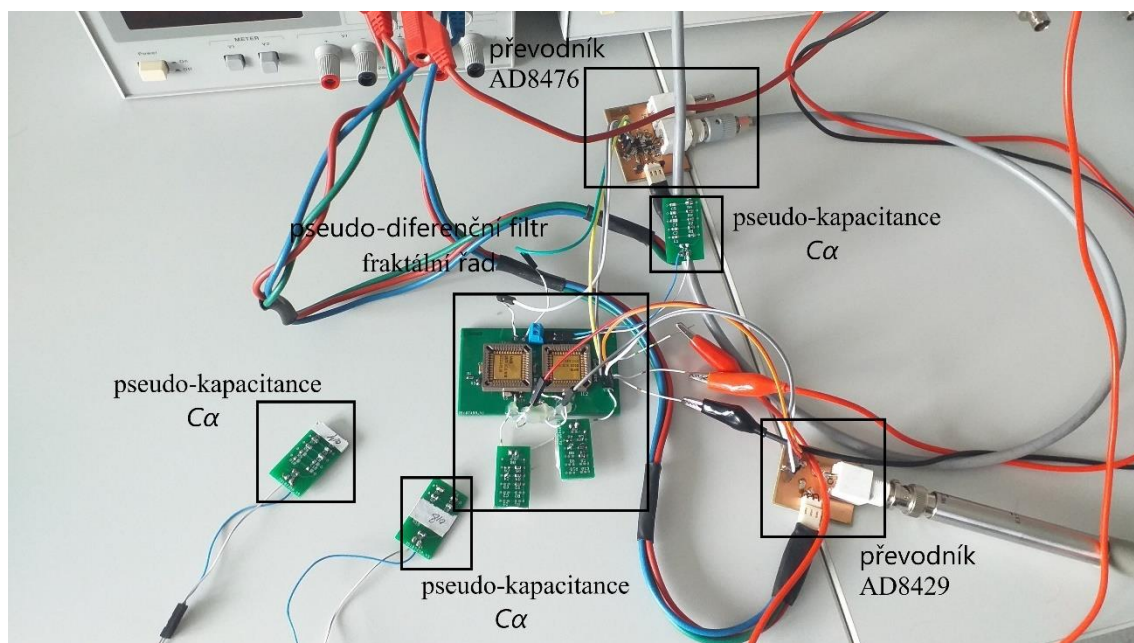
## 4. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A SIMULACE

Pro praktickou část měření byl použit nově navržený pseudo-diferenční filtr který byl popsán v kap. 3. Jedná se o filtr typu dolní propust. Poté bylo sledováno jeho chování při simulacích v programu OrCAD s využitím univerzálního proudového konveju třetí generace (UCC-3L). Využívá dva aktivní prvky, jimiž jsou konvejory typu UCC. Jeho schematické zapojení je zobrazeno na Obr.12. Dále bylo sledováno chování pseudo-kapacitance  $C_a$  při simulaci v programu OrCAD. Cílem experimentálního měření bylo ověření chování tohoto filtru s reálnými součástkami a porovnání jeho chování s teorií a simulací. Pro experimentální měření byl využit univerzální proudový konveju UCC N1B [21], Struktura prvního čipu byla transformována na diferenční rozdílový proudový konveju DDCC a struktura druhého čipu na diferenční proudový konveju DVCC (viz kap. 2). Veškeré naměřené hodnoty a grafy byly získány za pomoci obvodového analyzátoru Agilent 4395 A.

Pro správné měření bylo potřeba převést nediferenční vstupní napětí na diferenční pomocí převodníku zkonstruovaného integrovaným obvodem AD8476 [23] a výstupní napětí z diferenčního na nediferenční pomocí převodníku zkonstruovaného integrovaným obvodem AD8429 [24]. Pro ověření správnosti diferenčního zapojení byl do obvodu přidán ještě sumační zesilovač realizovaný integrovaným obvodem AD8271 [25], kterým bylo přivedeno souhlasné napětí  $U_{COM}$ . Celkové blokové schéma experimentálního měření a fotografie je na Obr. 14 a Obr. 15. Deska plošných spojů byla vytvořena v programu Eagle 9.6.2 Premium. Dokumentace k těmto deskám je uvedena v přílohách pseudo-diferenční kmitočtový filtr fraktálního řádu, Pseudo-kapacitance  $C_a$ . Měření na obvodovém analyzátoru bylo prováděno s šířkou pásma 30 Hz, vstupní signál měl hodnotu 0 dBm a měření probíhalo v rozmezí od 1 kHz do 10 MHz. Ukázky originálního měření pomocí obvodového analyzátoru Agilent 4395 A jsou v příloze C.



Obr. 14: Blokové schéma zapojení



Obr. 15: zapojení při měření v laboratoři

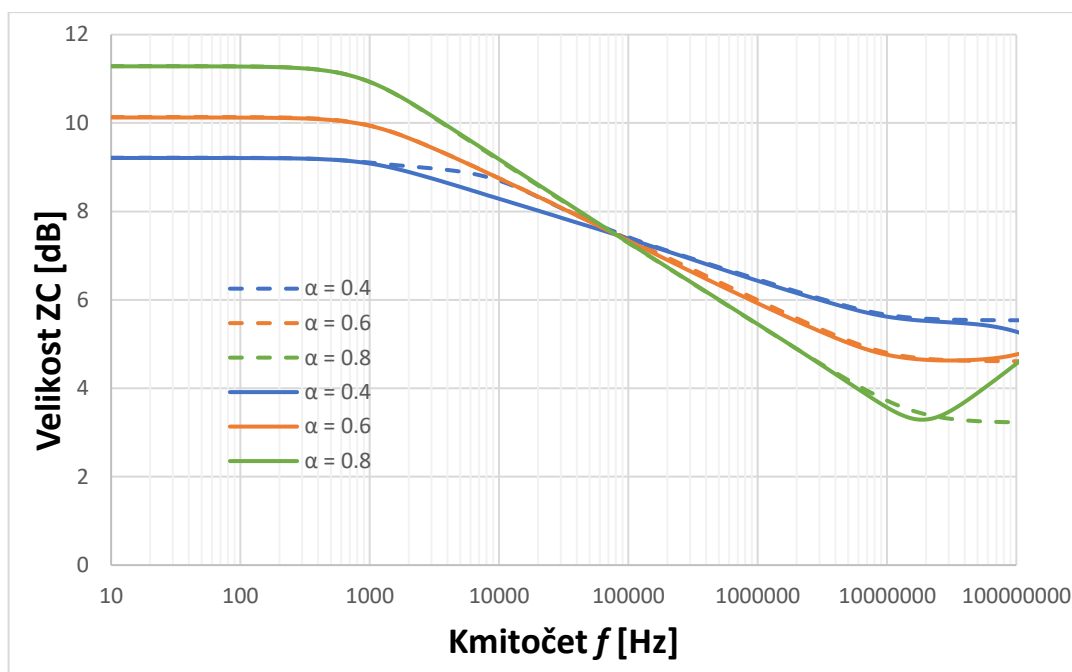
#### 4.1 Měření a simulace pseudo-kapacitance $C_\alpha$ (FOE)

Schematické zapojení pseudo-kapacitance  $C_\alpha$  je na Obr. 13 v kap. 0. Jedná se o síť RC 7. řádu typu Foster II. Pomocí [21] a programu MATLAB byly získané hodnoty jednotlivých rezistorů a kondenzátorů FOE, které jsou popsány v Tab.2. Simulace byly provedeny v programu OrCAD. Deska plošných spojů je uvedena v příloze B. Pro měření byly použity zaokrouhlené hodnoty, které nalezneme v Tab.3. Dále mezní kmitočet  $f_0 = 100$  kHz a přibližný rozsah pro FOE byl zvolen od 1 kHz až po 10 MHz. Měření bylo provedeno pro tři hodnoty  $\alpha = (0.4, 0.6 \text{ a } 0.8)$ . Výsledky simulací a měření pro modulové a fázové charakteristiky pro tři aproximace FOE ( $\alpha = 0.4, 0.6, 0.8$ ) jsou na Obr. 16 a Obr. 17.

Tab. 3: použité hodnoty při měření FOE pro tři hodnoty  $\alpha$

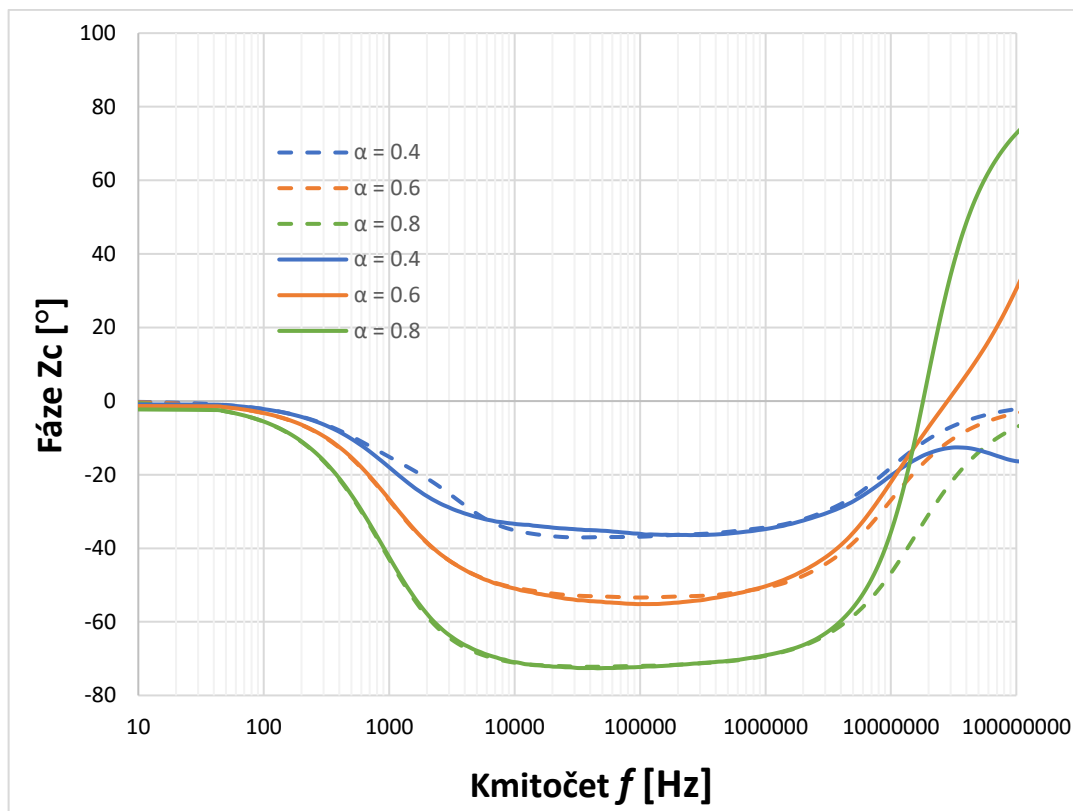
$\alpha$	0.4	0.6	0.8
$R_0 (\Omega)$	10000	25017	79592
$R_1 (\Omega)$	500	150	30
$R_2 (\Omega)$	1159	574	270
$R_3 (\Omega)$	2076	1385	891
$R_4 (\Omega)$	3590	3144	2712
$R_5 (\Omega)$	6200	6977	7826
$R_6 (\Omega)$	10714	16238	23538
$R_7 (\Omega)$	20764	42857	83077
$C_1 (\text{pF})$	47	150	390

$C_2$ (pF)	82	150	150
$C_3$ (pF)	150	220	180
$C_4$ (pF)	330	330	220
$C_5$ (pF)	740	560	270
$C_6$ (pF)	1.5 nF	920	330
$C_7$ (pF)	3.2 nF	1290	390



Obr. 16: Modulová charakteristika sítě RC (FOE) pro tři hodnoty  $\alpha$ , simulace (čárkovaně), měření (plná čára)

Na Obr.16 je modulová charakteristika sítě RC (FOE) pro tři hodnoty  $\alpha$ . Hodnoty modulu při mezní frekvenci  $f_0 = 100$  kHz u simulací jsou  $Z_C = 1645 \Omega$  pro  $\alpha = 0.4$ ,  $1592 \Omega$  pro  $\alpha = 0.6$  a  $1462 \Omega$  pro  $\alpha = 0.8$  a u měření jsou  $Z_C = 1588 \Omega$  pro  $\alpha = 0.4$ ,  $1507 \Omega$  pro  $\alpha = 0.6$  a  $1434 \Omega$  pro  $\alpha = 0.8$ . Při porovnání s Tab.1 můžeme potvrdit správné chování FOE. Ukazují se minimální odchylky, které jsou způsobené zaokrouhlením hodnot jednotlivých rezistorů a kondenzátorů.



Obr. 17: Fázová charakteristika sítě RC (FOE) pro tři hodnoty  $\alpha$ , simulace (čárkovaně), měření (plná čára)

Na Obr. 17 můžeme vidět fázovou charakteristiku sítě RC. Při porovnání simulací a měření vidíme, že průběhy se téměř shodují a dochází k minimálním odchylkám na začátku při  $\alpha = 0.4$  a  $\alpha = 0.6$  které jsou způsobeny zaokrouhlením hodnot jednotlivých rezistorů a kondenzátorů. I tak se nám potvrdilo správné chování FOE a výsledek potvrzuje správnou aproximaci ve frekvenční rozsahu.

## 4.2 Měření a simulace pseudo-diferenčního filtru fraktálního řádu

Zapojení filtru typu dolní propust druhého řádu pracujícího v napětřovém režimu je na Obr.12 v kap.0 . Obvod je složen ze dvou aktivních prvků. Jednoho diferenčního rozdílového proudového konveju (DDCC) a diferenčního proudového konveju (DVCC). Filtr dále obsahuje čtyři pasivní prvky, dva rezistory ( $R_1, R_2$ ), jeden kondenzátor ( $C_1$ ) a pseudo-kapacitanci  $C_\alpha$ . Pro experimentální měření byly využity dva univerzální proudové konvejory UCC-N1B [21], jeden byl transformován na diferenční rozdílový proudový konveju DDCC a druhý byl transformován na diferenční proudový konveju typu DVCC. Vytvořená deska plošných spojů je uvedena v příloze pseudo-diferenční kmitočtový filtr fraktálního řádu.

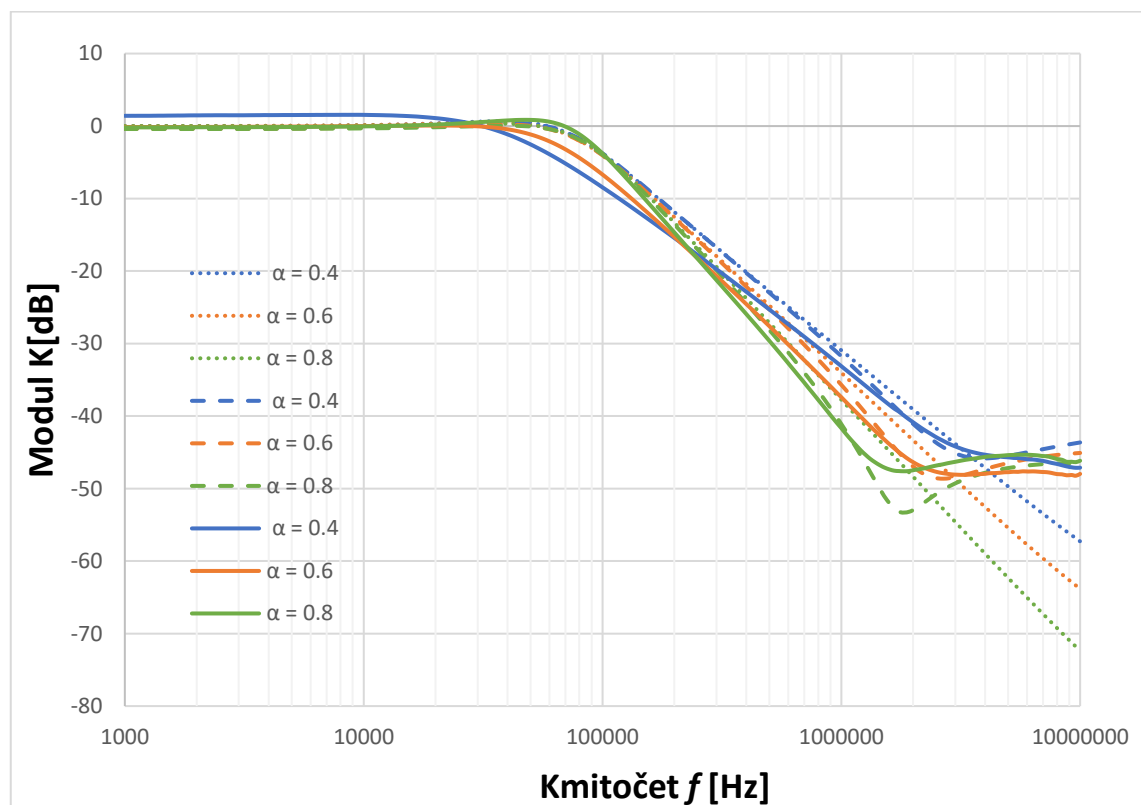
U simulace i experimentálního měření byl mezní kmitočet nastaven na  $f_0 = 100$  kHz a hodnota kapacitoru  $C_1 = 1$  nF. Hodnoty rezistorů byly získány z rovnic (3.7) a (3.8).

Pro  $\alpha = 0.4$ ,  $R_1 = 1089 \Omega \approx 1100 \Omega$ ,  $R_2 = 2805 \Omega \approx 2700 \Omega$ .

Pro  $\alpha = 0.6$ ,  $R_1 = 1457 \Omega \approx 1500 \Omega$ ,  $R_2 = 1957 \Omega \approx 2000 \Omega$ .

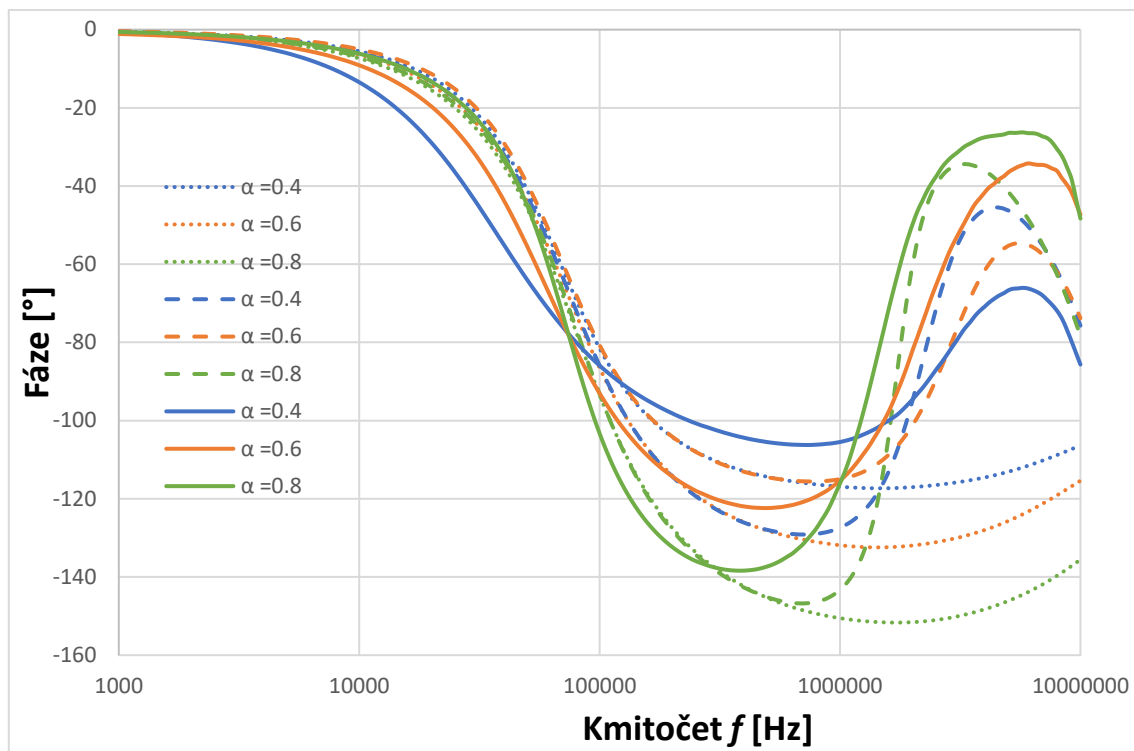
Pro  $\alpha = 0.8$ ,  $R_1 = 1923 \Omega \approx 2000 \Omega$ ,  $R_2 = 1391 \Omega \approx 1500 \Omega$ .

Výsledky teoretické analýzy, simulace a experimentálního měření pro modulovou charakteristiku jsou zobrazeny na Obr. 18. A pro fázovou charakteristiku na Obr. 19.



Obr. 18: Modulová charakteristika pseudo-diferenčního filtru fraktálního řádu pro tři hodnoty  $\alpha$ , teorie (tečkovaně), simulace (čárkovaně), měření (plná čára)

Z Obr. 18 lze vyčíst mezní kmitočty pro  $\alpha = 0.4$ ,  $\alpha = 0.6$  a  $\alpha = 0.8$ . Tyto hodnoty odečítáme při poklesu modulové charakteristiky o -3 dB. Mezní kmitočty  $f_0$  u měření pak vychází přibližně  $f_0 = 55$  kHz pro  $\alpha = 0.4$ ,  $f_0 = 70$  kHz pro  $\alpha = 0.6$  a  $f_0 = 93$  kHz pro  $\alpha = 0.8$ . Při porovnání měření s teorií a simulací plyne, že nejlepší výsledek nám vykazuje pseudo-diferenční filtr fraktálního řádu při použití pseudo-kapacitance  $C_\alpha$ , kde je  $\alpha = 0.8$ . To znamená, že filtr funguje velmi dobře při použití správných hodnot v síti RC. Proto nám měření ukazuje horší výsledky při  $\alpha = 0.4$ ,  $\alpha = 0.6$ . Je to způsobeno zaokrouhlením hodnot jednotlivých rezistorů a kondenzátorů, parazitních vlastností aktivních prvků, i chybou pájení. Horší chování pro  $\alpha = 0.4$  a  $\alpha = 0.6$  se nám projevila i u fáze, viz Obr. 19.

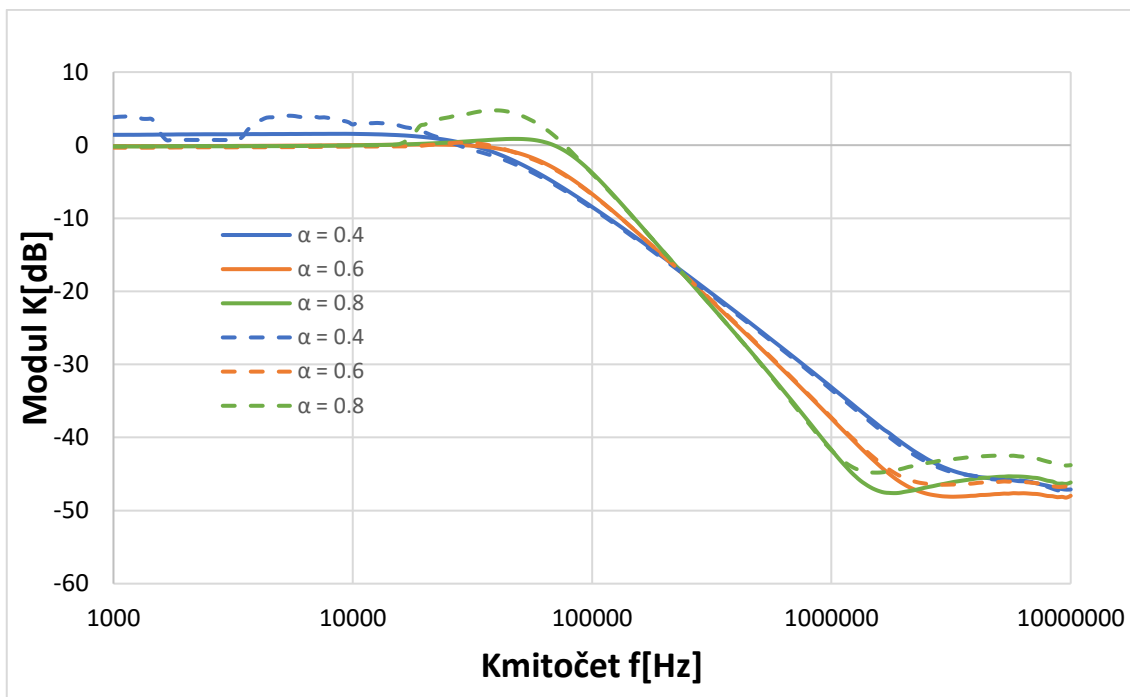


Obr. 19: Fázová charakteristika pseudo-diferenčního filtru fraktálního řádu pro tři hodnoty  $\alpha$ , teorie (tečkovaně), simulace (čárkovaně), měření (plná čára)

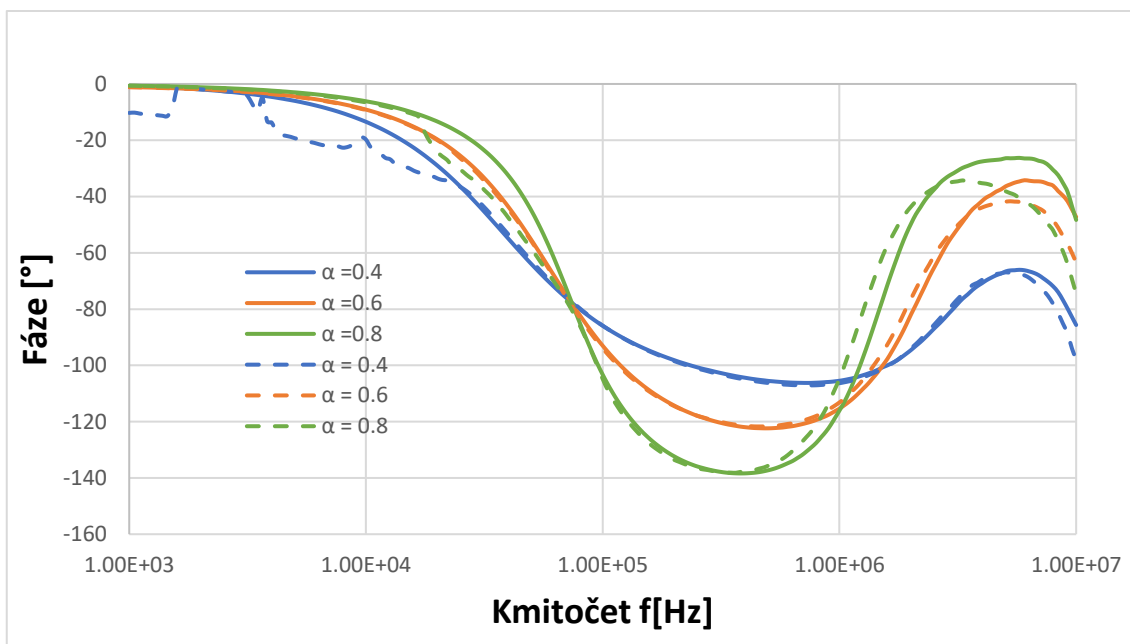
Na Obr. 19 můžeme vidět fázovou charakteristiku pseudo-diferenčního filtru fraktálního řádu pro tři hodnoty  $\alpha = 0.4, 0.6$  a  $0.8$ . Z grafu plyne bez ohledu na chyby, které jsou způsobeny zaokrouhlením hodnot jednotlivých rezistorů a kondenzátorů, že tento filtr funguje velmi dobře a potvrzuje to průběh pro  $\alpha = 0.8$  kde byly správné hodnoty jednotlivých rezistorů a kondenzátorů. Můžeme říct, že výsledky potvrzují správnou funkčnost a vlastnosti pseudo-diferenčního filtru fraktálního řádu  $(1 + \alpha)$ .

### 4.3 Chování pseudo-diferenčního filtru fraktálního řádu při změně napájecího napětí

Cílem tohoto měření bylo zjistit, jak pseudo-diferenční filtr fraktálního řádu reaguje na změnu napájecího napětí. Pro univerzální proudový konvektor UCC-N1B je optimální napájecí napětí  $\pm 1,65$  V a jeho odběr na jeden proudový konvektor je 27 mA [21]. Napětí bylo změněno na  $\pm 1.50$  V, což je snížení cca o 9 %.



Obr. 20: Modulová charakteristika pseudo-diferenčního filtru fraktálního řádu při snížení napájecího napětí o 9 %, při 1.5 V (čárkovaně), při 1.65 V (plná čára)



Obr. 21: Fázová charakteristika pseudo-diferenčního filtru fraktálního řádu při snížení napájecího napětí o 9 %, při 1.5 V (čárkovaně), při 1.65 V (plná čára)

Obr. 20, popisuje reakci na snížení napájecího napětí. Nejvíce se projevila změna u  $\alpha = 0.4$  a  $\alpha = 0.8$ , kde se útlum zvýšil z 0 dB přibližně na 5 dB. U  $\alpha = 0.8$  se útlum snížil z -48 dB na -44 dB, u  $\alpha = 0.6$  se útlum snížil z -48 dB na -46 dB. Můžeme říct, že změna napájení pro  $\alpha = 0.6$  není příliš významná jak u modulové, tak i fázové charakteristiky (Obr. 21). Obecně lze tyto odchylky zanedbat.

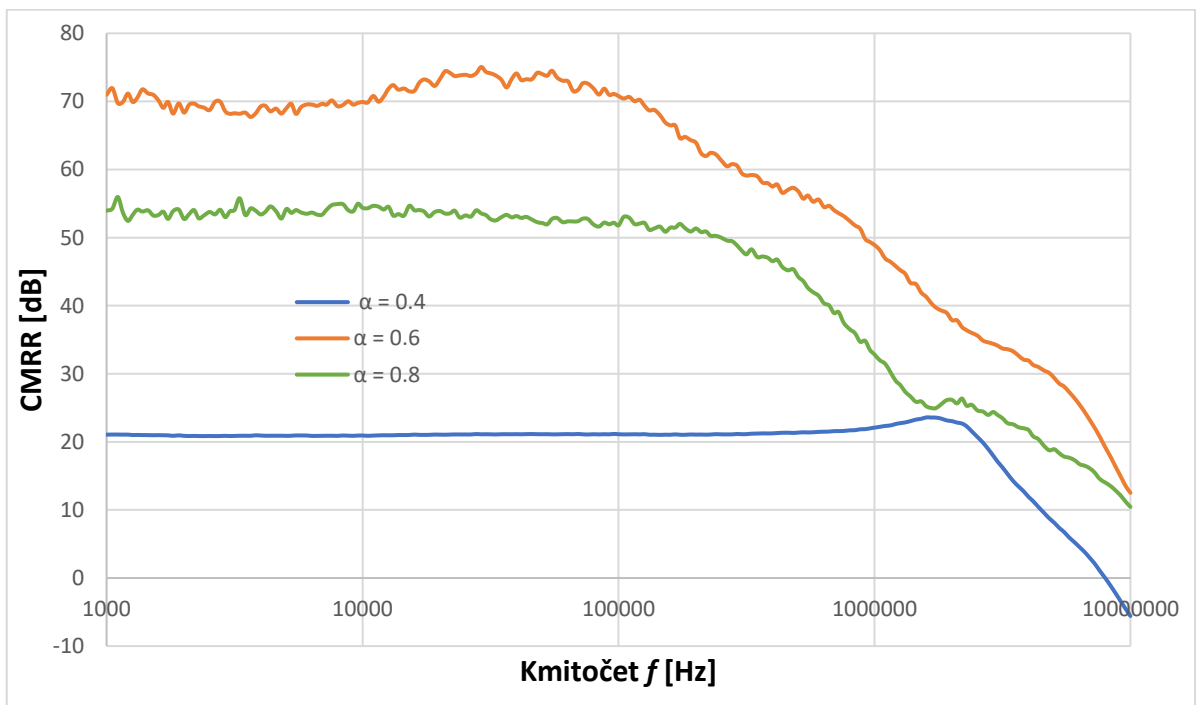


#### 4.4 CMRR (common mode rejection ratio)

Potlačení souhlasného signálu nebo-li CMRR (Common-mode rejection ratio) je hodnota která udává, zda je daný filtr schopen potlačit nežádoucí souhlasný vstupní signál. Při ideálním stavu by CMRR mělo být nekonečno. CMRR lze vypočítat pomocí rovnice (4.1).

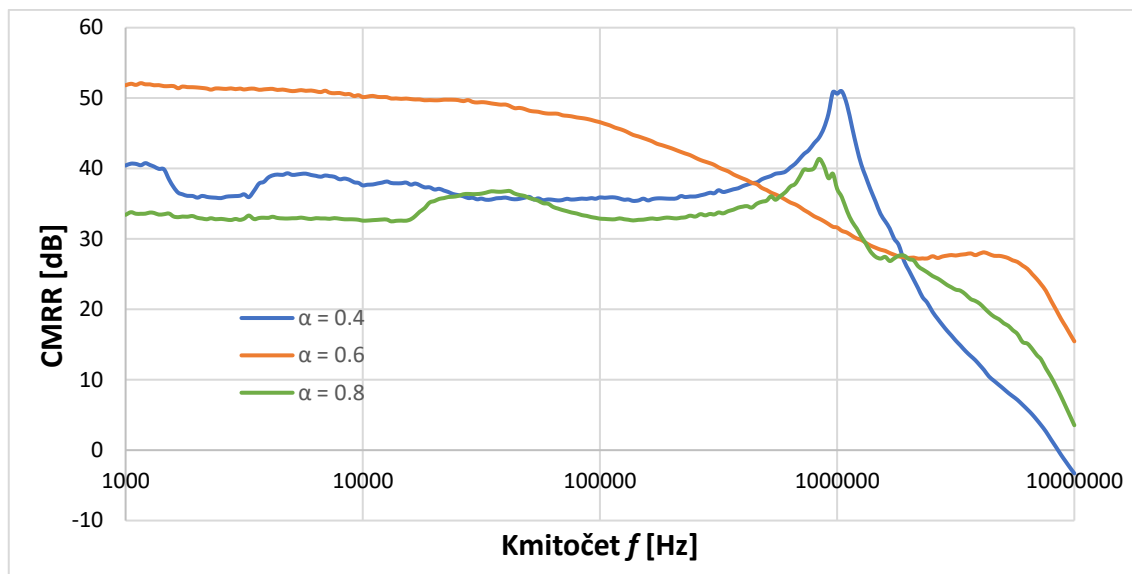
$$CMRR = 20 \log \frac{A_{dm}}{A_{cm}} [dB] \quad (4.1)$$

$A_{dm}$  je diferenční zesílení a  $A_{cm}$  je zesílení souhlasného signálu. Čím vyšší hodnota CMRR, tím nižší je šumová složka. Ukázky originálního měření pro CMRR jsou v příloze C. Schopnost filtru potlačit souhlasný signál pro ideální napájecí napětí je na Obr. 22.



Obr. 22: Potlačení souhlasného signálu

Z Obr.22 jde vidět, že filtr je schopen potlačit souhlasný signál při  $\alpha = 0.8$  o 55 dB, při  $\alpha = 0.6$  o 70 dB, což můžeme považovat za velmi pěkné. Při  $\alpha = 0.4$  bylo provedeno chybné měření. Pravděpodobně se jedná o chybu vlivem napájení jednoho z aktivních prvků. Proto nám vykazuje špatné výsledky, což se projeví jako útlum 20 dB.



Obr. 23: Potlačení souhlasného signálu při snížení napájecího napětí o 9%

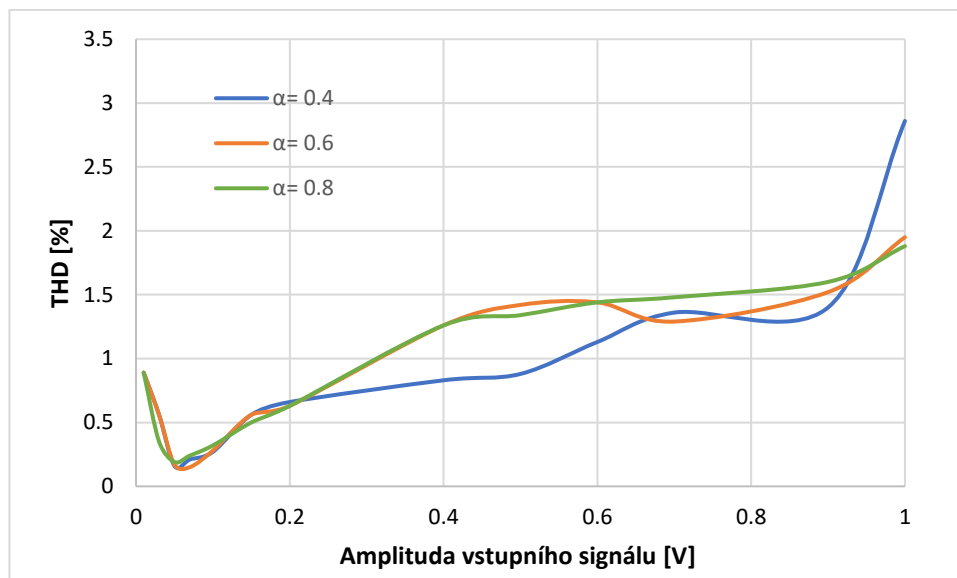
Z Obr. 23 je patrné, že pseudo-diferenční filtr fraktálního řádu při změně napájecího napětí potlačuje souhlasný signál o 33 dB pro  $\alpha = 0.8$ , 40 dB pro  $\alpha = 0.4$  a 51 dB pro  $\alpha = 0.6$ . Oproti ideálnímu napájecímu napětí, kde CMRR je přibližně 20, 70 a 55 dB pro  $\alpha = 0.4, 0.6, 0.8$ .

## 4.5 THD - Celkové harmonické zkreslení

THD nebo-li celkové harmonické zkreslení je definováno jako poměr vyšších harmonických složek ku základní harmonické složce, a je vyjádřeno pomocí vztahu (4.2):

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} [\%] \quad (4.2)$$

Při měření bylo uvažováno prvních pět harmonických složek, tedy  $U_1$  až  $U_5$ . Pomocí rovnice (4.2) bylo vypočteno THD. Obr. 24, ukazuje změnu THD v závislosti na amplitudě vstupního signálu.



Obr. 24: Harmonické zkreslení filtru pro tři hodnoty  $\alpha$  a při napájení napětím  $\pm 1.65$  V

Z Obr. 24 vyplývá, že pseudo-diferenční filtr fraktálního řádu pro tři hodnoty  $\alpha$  a amplitudu vstupního signálu pod 0.8 V ukazuje celkové harmonické zkreslení pod 1.5 %. Po 0.8 V se zhorší nejvíc pro  $\alpha = 0.4$  kde dosáhne 3 %.

## 5. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo nastudovat problematiku pseudo-diferenčních kmitočtových prvků, vytvoření návrhu pseudo-diferenčního kmitočtového filtru fraktálního řádu, následnou simulaci, zkonstruování a proměření vytvořeného přípravku.

V úvodní části (kap.1) byly popsány základní vlastnosti kmitočtových filtrů, jejich typy a využití. Následuje popis diferenčních a pseudo-diferenčních filtrů. Dále popis pseudo-diferenčních filtrů fraktálního řádu a jejich využití. Dále byl popsán prvek FOE a metody pro jeho návrh. V našem případě se jedná o strukturu sítě RC 7. řádu typu Foster II.

Další část se věnuje použití aktivních prvků (konvektorů), které byly v této práci použity (UCC, DDCC, DVCC) (kap.2).

V třetí části (kap.3) se práce věnuje návrhu pseudo-diferenčního filtru fraktálního řádu a jeho simulaci v prostředí programu OrCAD. Obvod je zkonstruován pomocí dvou aktivních prvků (DDCC a DVCC) a obsahuje čtyři pasivní prvky. Pomocí [8] a rovnic (3.3) byly vypočítané hodnoty koeficientů  $k_1$ ,  $k_2$  a  $k_3$ . Následně byly ověřeny v programu OrCAD pro mezní kmitočet  $f_0 = 100$  kHz pomocí konvektorů UCC-1L a UCC-3L. Pomocí [21] a programu MATLAB, byly získané hodnoty kondenzátorů a odporů sítě Foster II. Pro FOE byl zvolen mezní kmitočet  $f_0 = 100$  kHz a přibližný rozsah od 1 kHz až 10 MHz.

V praktické části (kap.4) byl experimentálně ověřen pseudo-diferenční filtr fraktálního řádu pro tři hodnoty  $\alpha$  (0.4, 0.6, 0.8). Filtr realizuje dolní propust řádu  $(1 + \alpha)$ . Také bylo ověřeno chování pseudo-kapacitance  $C_\alpha$ , a výsledky byly porovnávány se simulacemi a ideálními průběhy. Měření probíhalo pro napájecí napětí  $\pm 1.65$  V a pro snížené napájecí napětí  $\pm 1.50$  V. Modulová charakteristika sítě RC (FOE) pro tři hodnoty  $\alpha$ . Hodnoty modulu při mezní frekvenci  $f_0 = 100$  kHz u simulací jsou  $Z_C = 1645 \Omega$  pro  $\alpha = 0.4$ ,  $1592 \Omega$  pro  $\alpha = 0.6$  a  $1462 \Omega$  pro  $\alpha = 0.8$  a u měření jsou  $Z_C = 1588 \Omega$  pro  $\alpha = 0.4$ ,  $1507 \Omega$  pro  $0.6$  a  $1434 \Omega$  pro  $0.8$  V porovnání s Tab.1 můžeme potvrdit správné chování FOE. Vykazují se zde minimální odchylky, které jsou způsobené zaokrouhlením hodnot jednotlivých rezistorů a kondenzátorů.

U fázové charakteristiky RC sítě (Obr. 17) dochází při porovnání mezi simulací a měřeními k minimálním odchylkám pro  $\alpha = 0.4$  a pro  $\alpha = 0.6$  které jsou způsobeny zaokrouhlením hodnot jednotlivých rezistorů a kondenzátorů. I tak se nám zde potvrdilo správné chování FOE a výsledek potvrzuje správnou aproximaci ve frekvenční rozsahu. U modulové charakteristiky pseudo-diferenčního filtru fraktálního řádu (Obr. 18) lze vyčíst mezní kmitočty pro  $\alpha = 0.4$ ,  $\alpha = 0.6$  a  $\alpha = 0.8$ . Tyto hodnoty odečítáme při poklesu modulové charakteristiky o -3 dB. Mezní kmitočty  $f_0$  u měření pak vychází přibližně  $f_0 = 55$  kHz pro  $\alpha = 0.4$ ,  $f_0 = 70$  kHz pro  $\alpha = 0.6$  a  $f_0 = 93$  kHz pro  $\alpha = 0.8$ . Při porovnání měření s teorií a simulací plyne, že nejlepší výsledek nám vykazuje pseudo-diferenční filtr fraktálního řádu při použití pseudo-kapacitance  $C_\alpha$  kde  $\alpha = 0.8$ . To znamená, že filtr

funguje velmi dobře při použití správných hodnot v síti RC. Proto nám měření ukazuje horší výsledky při  $\alpha = 0.4$ ,  $\alpha = 0.6$ . Je to způsobeno zaokrouhlením hodnot jednotlivých rezistorů a kondenzátorů, parazitních vlastností aktivních prvků, i chybou pájení. Horší chování pro  $\alpha = 0.4$  a  $\alpha = 0.6$  se nám projevila i u fáze, viz Obr. 19.

U CMRR filtr byl schopen potlačit souhlasný signál při  $\alpha = 0.8$  o 55 dB, při  $\alpha = 0.6$  o 70 dB (Obr. 22), což můžeme považovat za dostatečné a při  $\alpha = 0.4$  bylo provedeno chybné naměření. Pravděpodobně se jedná o chybu vlivem napájení jednoho z aktivních prvků. Proto nám vykazuje špatné výsledky, což se projeví jako útlum 20 dB.

Při snížení napájecího napětí na  $\pm 1.50$  V. se nejvíce projevila změna u  $\alpha = 0.4$  a  $\alpha = 0.8$  (Obr. 20), kde se útlum zvýšil z 0 dB na přibližně 5 dB. U  $\alpha = 0.8$  se útlum snížil z -48 dB na -44 dB, u  $\alpha = 0.6$  se útlum snížil z -48 dB na -46 dB. Můžeme říct že změna napájení pro  $\alpha = 0.6$  není příliš významná jak u modulové, tak i fázové charakteristiky (Obr. 21). Obecně lze považovat tyto odchylky za zanedbatelné.

U CMRR (Obr. 23) byl filtr schopen potlačit při změně napájecího napětí souhlasný signál o 33 dB při  $\alpha = 0.8$ , o 40 dB při  $\alpha = 0.4$  a o 51 dB při  $\alpha = 0.6$  oproti ideálnímu napájecímu napětí, kde CMRR je přibližně 20 pro  $\alpha = 0.4$ , 70 pro  $\alpha = 0.4$  a 55 dB pro  $\alpha = 0.8$ .

U THD (Obr. 24) filtr vykazuje celkové harmonické zkreslení pod 1.5 %, při amplitudě vstupního signálu pod 0.8 V.

Na konci můžeme potvrdit, že filtr funguje velice dobře při použití správných hodnot v síti RC (FOE). Odchylky, jež se nám zobrazily jsou způsobené zaokrouhlením hodnot jednotlivých rezistorů a kondenzátorů RC sítě a výsledky potvrzují správnou funkčnost a vlastnosti filtru pseudo-diferenčního fraktálního řádu  $(1 + \alpha)$ .

## LITERATURA

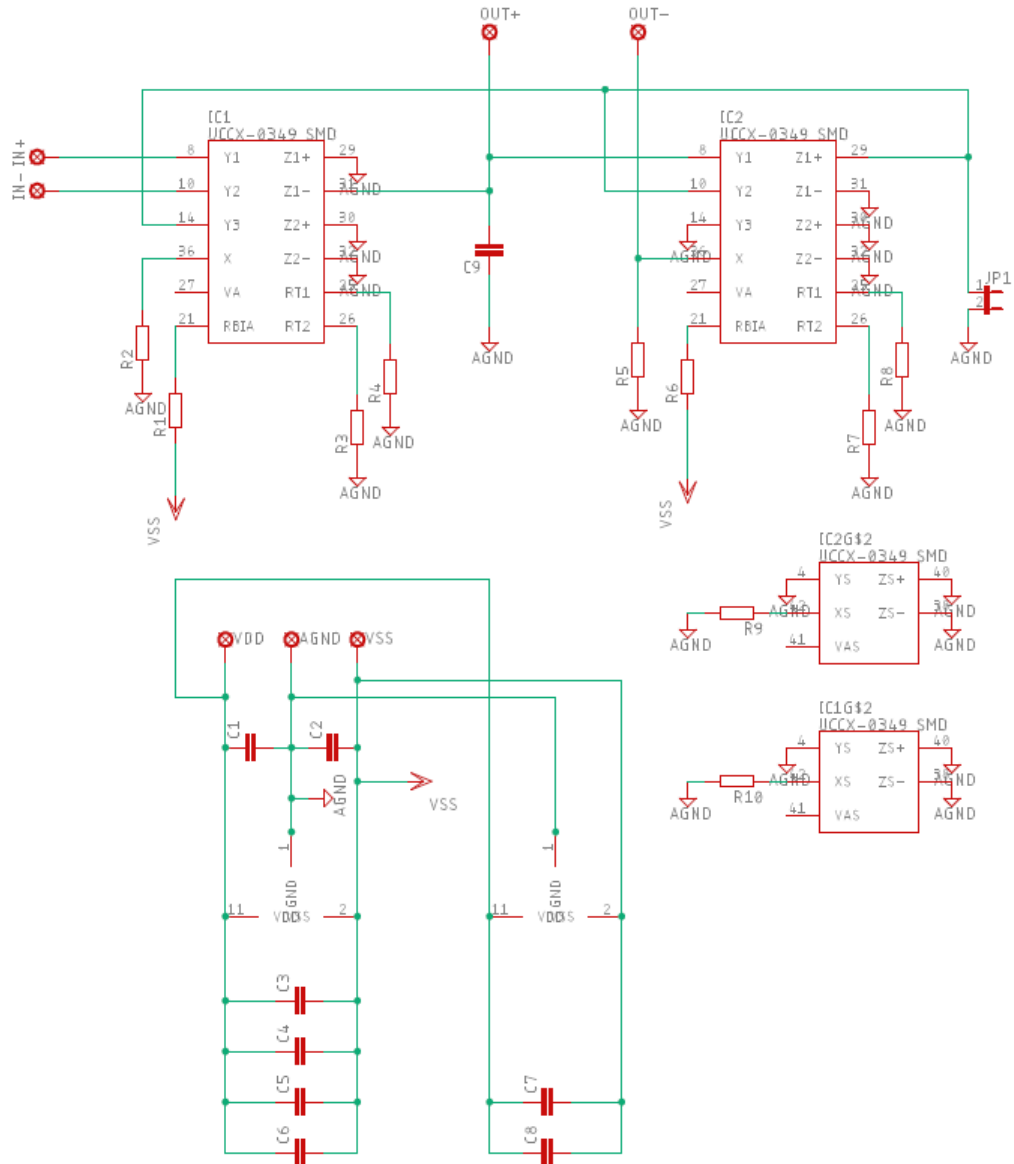
- [1] Hájek, K a Sedláček, J. Kmitočtové filtry. BEN- technická literatura, Praha 2002. ISBN 80-7300-023-7.
- [2] SLÁDOK, O. Diferenční a pseudo-diferenční kmitočtové filtry. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 100 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.
- [3] VRBA, K. Analogová technika: Vysoké učení technické v Brně, 2012, ISBN 978-80-214-4458-4.
- [4] ZAPLETAL, M. Plně diferenční kmitočtové filtry s říditelným aktivním prvky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 59 s.
- [5] JEŘÁBEK, Jan. Kmitočtové filtry s proudovými aktivními prvky: zkrácená verze Ph.D. Thesis. [V Brně: Vysoké učení technické], c2011, 32 s. ISBN 978-80-214-4337-2.
- [6] KOTOT, J.; SLÁDOK, O.; HERENCŠÁR, N.; HORNG, J. *Pseudo-differential second-order band-reject filter using current conveyors*. AEU – International Journal of Electronics and Communications, 2016, roč. 70, č. 6, s. 814-821. ISSN:1434-8411
- [7] G. Tsirimokou and C. Psychalinos, "Ultra-Low Voltage Fractional-Order Circuits Using Current-Mirrors," International Journal of Circuit Theory and Applications, vol. 44, pp. 109-126, January 2016.
- [8] T. J. Freeborn, B. Maundy, and A. S. Elwakil, "Field programmable analogue array implementation of fractional step filters," IET Circuits, Devices and Systems, vol. 4, pp. 514-524, 2010.
- [9] T. J. Freeborn, B. Maundy, and A. Elwakil, "Fractional-step Tow- Thomas biquad filters," Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, vol. 3, no. 3, pp. 357-374, 2012.
- [10] T. J. Freeborn, "A Survey of Fractional-Order Circuit Models for Biology and Biomedicine," IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, vol. 3, pp. 416-424, 2013.

- [11] T. Haba, G. Loum, J. Zoueu, and G. Ablart, "Use of a Component with Fractional Impedance in the Realization of an Analogical Regulator of Order  $1/2$ ," *Journal of Applied Sciences*, vol. 8, pp. 59-67, 2008.
- [12] A. Elwakil, "Fractional-Order Circuits and Systems: An Emerging Interdisciplinary Research Area," *IEEE Circuits and Systems Magazine* vol. 10, pp. 40-50, 2010.
- [13] Todd J. Freeborn<sup>1</sup>. Comparison of  $(1 + \alpha)$  Fractional-Order Transfer Functions to Approximate Lowpass Butterworth Magnitude Responses. *Circuits Syst Signal Process*, (2016) 35:1983–2002, DOI 10.1007/s00034-015-0226-y.
- [14] B. Maundy, A. S. Elwakil, and T. J. Freeborn, "On the practical realization of higher-order filters with fractional stepping," *Signal Processing*, vol. 91, no. 3, pp. 484-491, 2011
- [15] Krishna and K. Reddy, "Active and passive realization of fractance device of order  $1/2$ ," *Active and Passive Electronic Components*, vol. 2008, 2008.
- [16] BEČVÁŘ, D.; VRBA, K. Univerzální proudový konvektor[online]. *Elektronický časopis*. Dostupné z URL: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00007/index.html>.
- [17] KRISHNA, M., KUMAR, NA V., SRINIVASULU, A V. Differential difference current conveyor based cascadable voltage mode first order all pass filters ISBN: 978-1-61804-056-5
- [18] SLÁDOK, O. Diferenční struktury lineárních obvodů s DDCC a DVCC. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 65 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.
- [19] T. Freeborn. Comparison of  $(1+\alpha)$  fractional-order transfer functions to approximate lowpass butterworth magnitude responses. *Circuits Systems, and Signal Processing*. (2015). 35. 10.1007/s00034-015-0226-y.
- [20] FREEBORN, T., MAUNDY, B., ELWAKIL, A. Field programmable analogue array implementation of fractional step filters. *IET Circuits Devices and Systems* 2010; 4(6):514–524. [cit. 2015-12-11].
- [21] G. Tsirimokou, "A systematic procedure for deriving RC networks of fractional-order elements emulators using MATLAB", *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 78, pp. 7–14, (2017). DOI: 10.1016/j.aeue.2017.05.003

- [22] Datasheet UCC-N1B - Universal Current Conveyor (UCC) and Second-Generation Current Conveyor (CCII+/-), Brno University of Technology, On Semiconductor Ltd., Rev. 1, 2012
- [23] AD 8476, Low Power, Unity Gain Fully Differential Amplifier & ADC Driver. Datasheet, Analog Devices [online]. 2011. Dostupné z URL: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8476.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8476.pdf).
- [24] AD 8429, 1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  Low Noise Instrumentation Amplifier. Datasheet, Analog Devices [online] 2011. Dostupné z URL: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8429.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8429.pdf).
- [25] AD 8271, Programmable Gain Precision Difference Amplifier. Datasheet, Analog Devices [online] 2009. Dostupné z URL: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8271.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8271.pdf).



## Příloha A - pseudo-diferenční kmitočtový filtr fraktálního řádu



Obr. 25: Zapojení pseudo-diferenční kmitočtový filtr fraktálního řádu

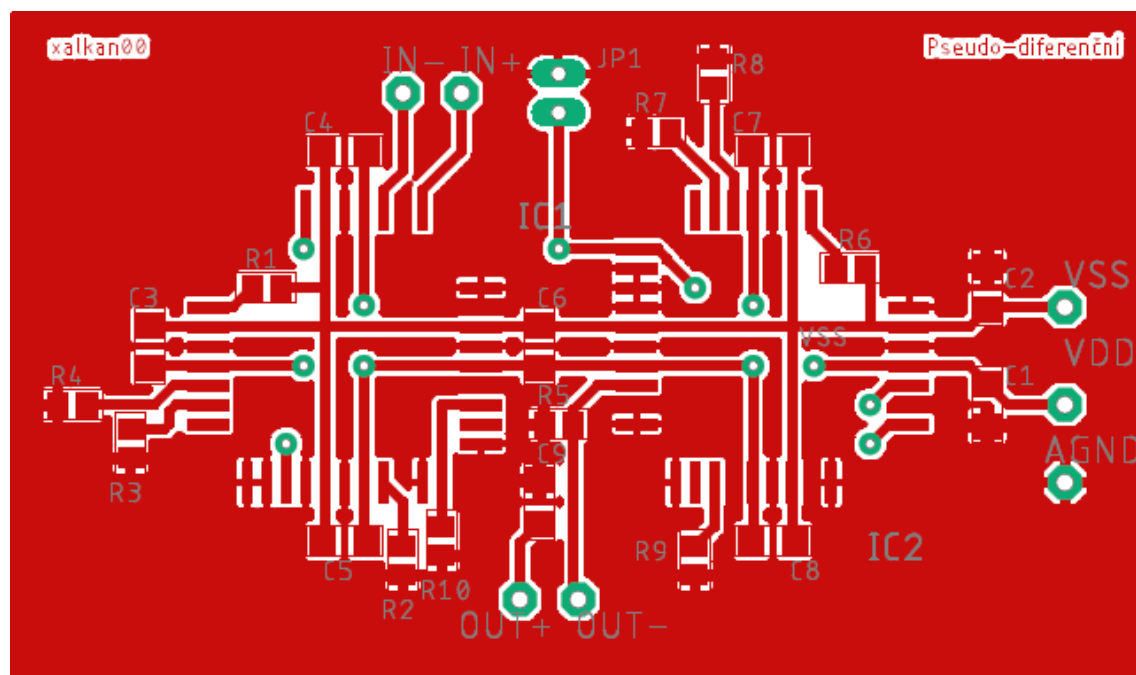
Seznam součástek:

$R_1 = 4.7k\Omega$	M0805
$R_2 = 1.1k\Omega / 1.5k\Omega / 2k\Omega$	M0805
$R_3 = 8.2k\Omega$	M0805
$R_4 = 8.2k\Omega$	M0805
$R_5 = 2.7k\Omega / 2k\Omega / 1.5k\Omega$	M0805
$R_6 = 4.7k\Omega$	M0805
$R_7 = 8.2k\Omega$	M0805

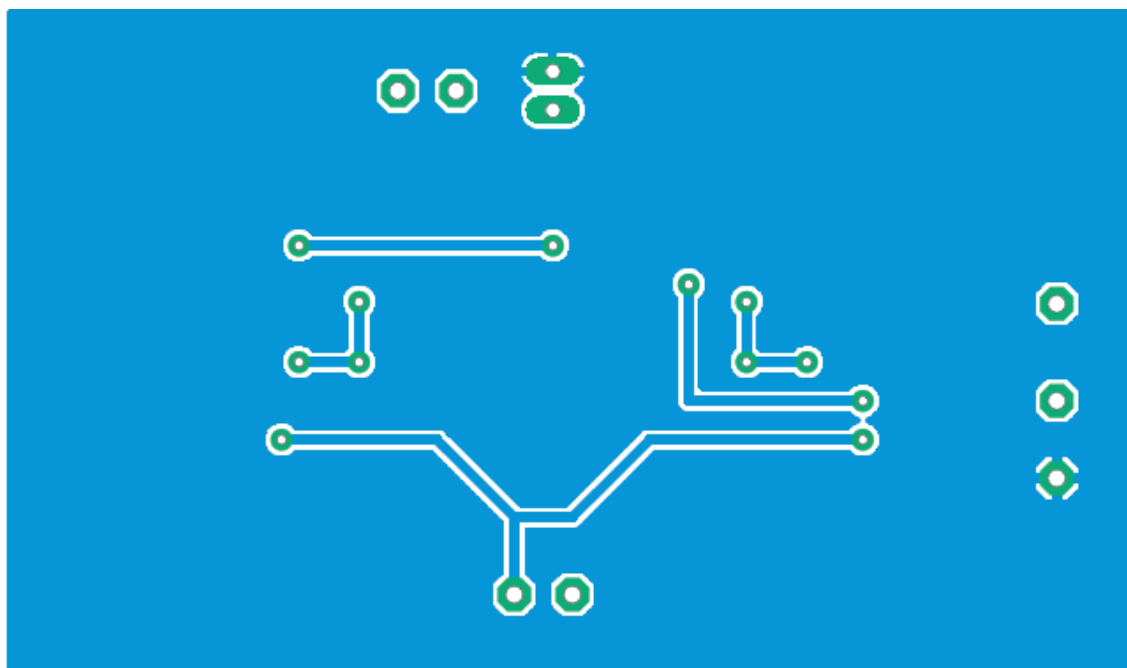
$R_8 = 8.2k\Omega$	M0805
$R_9 = 1k\Omega$	M0805
$R_{10} = 1k\Omega$	M0805

$C_1 = 4.7\mu F$	M0805
$C_2 = 4.7\mu F$	M0805
$C_3 = 68pF  47nF$	M1206
$C_4 = 68pF  47nF$	M1206
$C_5 = 68pF  47nF$	M1206
$C_6 = 68pF  47nF$	M1206
$C_7 = 68pF  47nF$	M1206
$C_8 = 68pF  47nF$	M1206
$C_9 = 1nF$	M0805

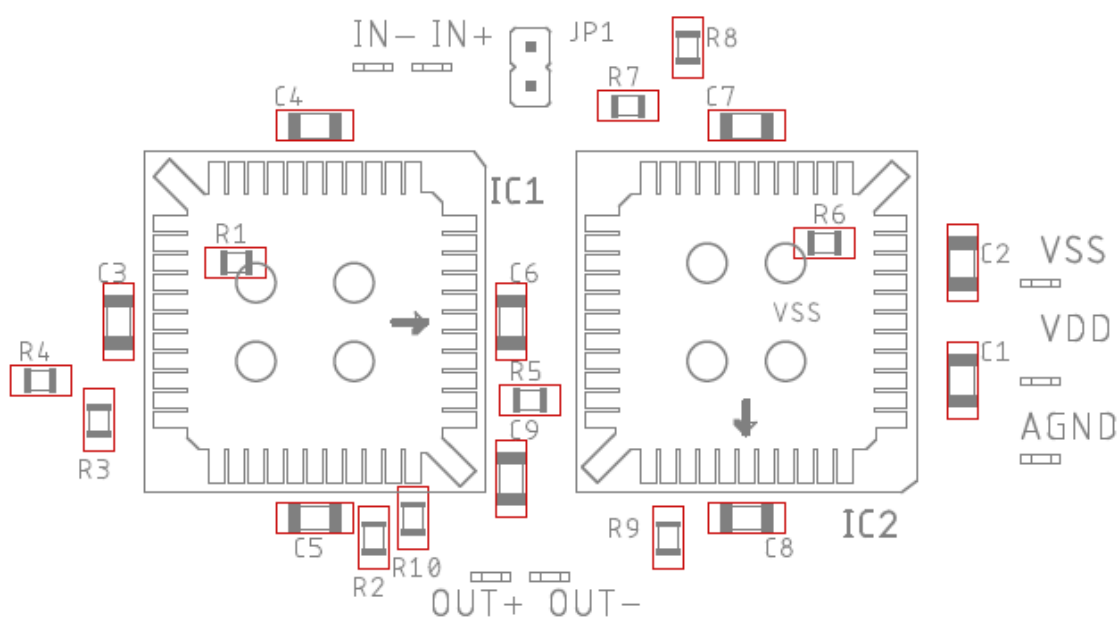
JP1	
UCC-N1B520	PLCCSM44 / 2x



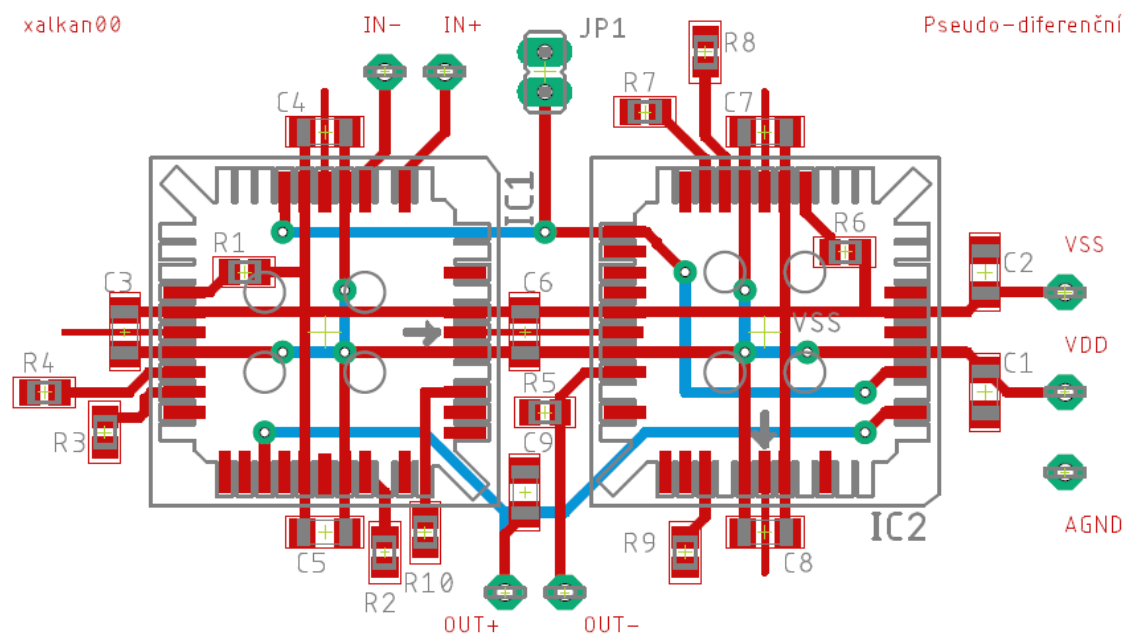
Obr. 26: Návrh desky plošných spojů (cesty) ze shora



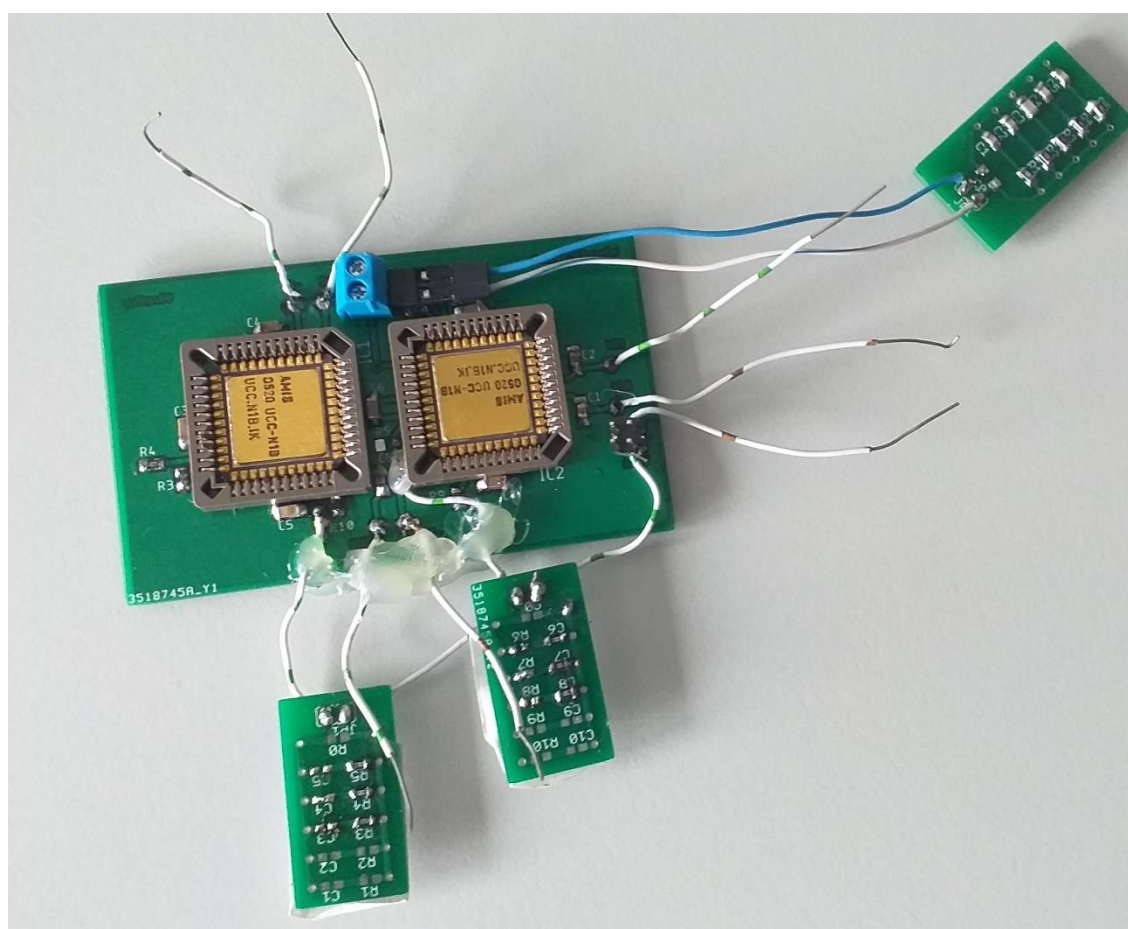
Obr. 27: Návrh desky plošných spojů (cesty) ze zdola



Obr. 28: Návrh desky plošných spojů (součástky)



Obr. 29: Návrh desky plošných spojů cesty a součástky ze shora a zdola

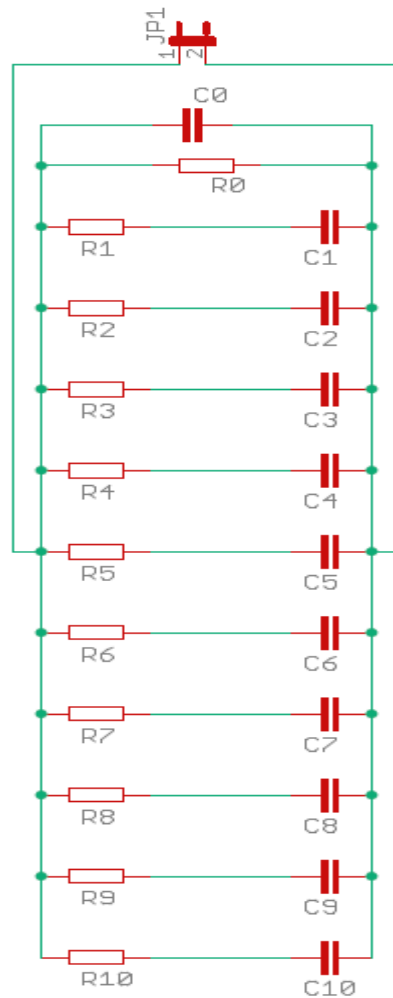


Obr. 30: Fotografie pseudodiferenčního filtru fraktální řád pohled ze shora



Obr. 31: Fotografie pseudo-diferenčního filtru fraktální řád pohled ze zdola

## Příloha B - Pseudo-kapacitance $C_\alpha$



Obr. 32: Zapojení pseudo-kapacitance  $C_\alpha$

Seznam součástek Pro  $\alpha = 0.4$ :

$R_0 = 10\text{k}\Omega$	M0805
$R_1 = 1\text{k}\Omega \parallel 1\text{k}\Omega$	M0805
$R_2 = 1.5\text{k}\Omega \parallel 5.1\text{k}\Omega$	M0805
$R_3 = 3.3\text{k}\Omega \parallel 5.6\text{k}\Omega$	M0805
$R_4 = 10\text{k}\Omega \parallel 5.6\text{k}\Omega$	M0805
$R_5 = 6.2\text{k}\Omega$	M0805
$R_6 = 100\text{k}\Omega \parallel 12\text{k}\Omega$	M0805
$R_7 = 33\text{k}\Omega \parallel 56\text{k}\Omega$	M0805

$C_1 = 47\text{pF}$	M0805
$C_2 = 82\text{pF}$	M0805
$C_3 = 150\text{pF}$	M0805
$C_4 = 330\text{pF}$	M0805
$C_5 = 270\text{pF} \parallel 470\text{pF}$	M0805
$C_6 = 820\text{pF} \parallel 820\text{pF}$	M0805
$C_7 = 1\text{nF} \parallel 2.2\text{nF}$	M0805

Seznam součástek Pro  $\alpha = 0.6$

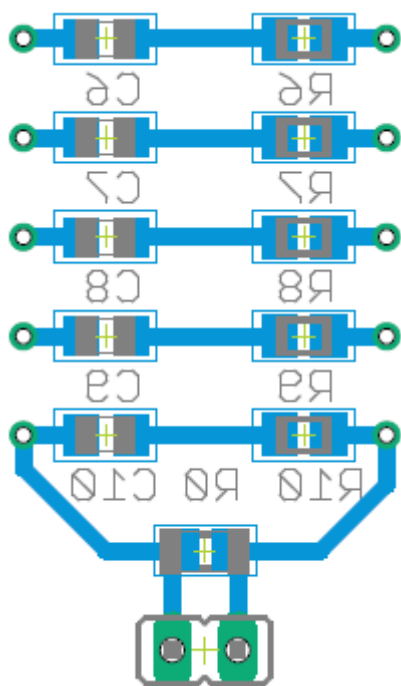
$R_0 = 82k\Omega    36k\Omega$	M0805
$R_1 = 150\Omega$	M0805
$R_2 = 1.1k\Omega    1.2k\Omega$	M0805
$R_3 = 18k\Omega    1.5k\Omega$	M0805
$R_4 = 8.2k\Omega    5.1k\Omega$	M0805
$R_5 = 100k\Omega    7.5k\Omega$	M0805
$R_6 = 62k\Omega    22k\Omega$	M0805
$R_7 = 100k\Omega    75k\Omega$	M0805

$C_1 = 150pF$	M0805
$C_2 = 150pF$	M0805
$C_3 = 220pF$	M0805
$C_4 = 330pF$	M0805
$C_5 = 560pF$	M0805
$C_6 = 100pF    820pF$	M0805
$C_7 = 820pF    470pF$	M0805

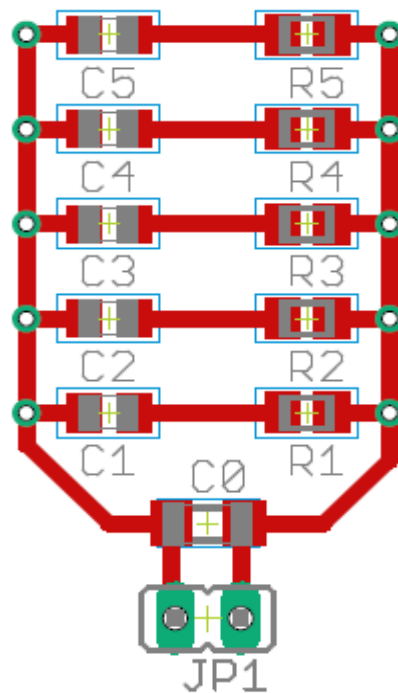
Seznam součástek Pro  $\alpha = 0.8$

$R_0 = 390k\Omega    100k\Omega$	M0805
$R_1 = 30\Omega$	M0805
$R_2 = 270\Omega$	M0805
$R_3 = 1k\Omega    8.2k\Omega$	M0805
$R_4 = 3.6k\Omega    11k\Omega$	M0805
$R_5 = 36k\Omega    10k\Omega$	M0805
$R_6 = 36k\Omega    68k\Omega$	M0805
$R_7 = 270k\Omega    120k\Omega$	M0805

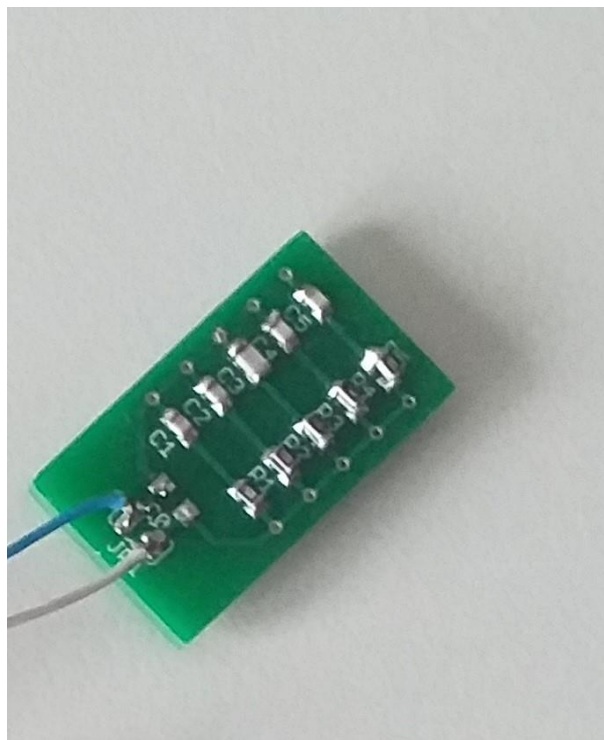
$C_1 = 390pF$	M0805
$C_2 = 150pF$	M0805
$C_3 = 180pF$	M0805
$C_4 = 220pF$	M0805
$C_5 = 270pF$	M0805
$C_6 = 330pF$	M0805
$C_7 = 390pF$	M0805



Obr. 34: Návrh desky plošných spojů (cesty) ze zdola



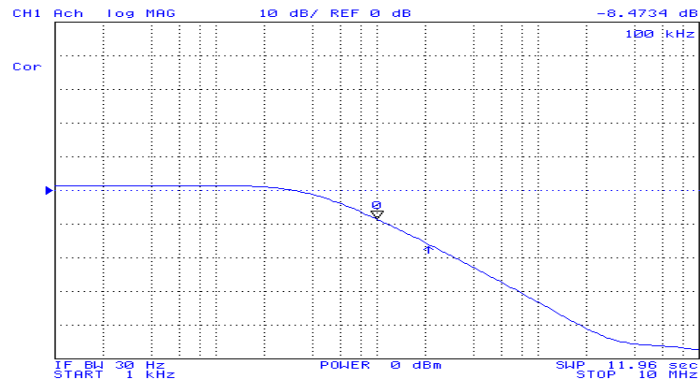
Obr. 33: Návrh desky plošných spojů (cesty) ze shora



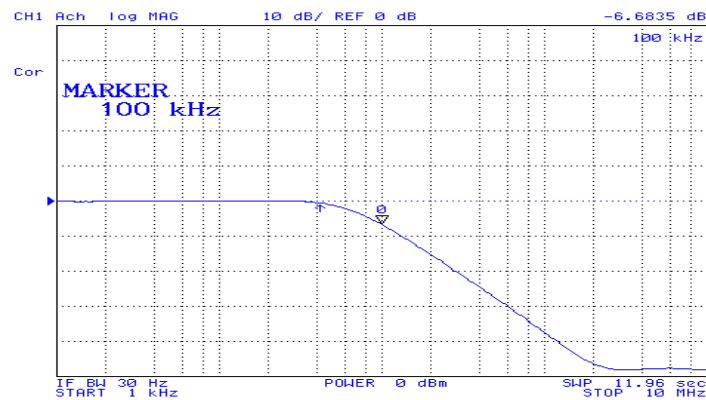
Obr. 35: Fotografie pseudo-kapacitance  $C_a$



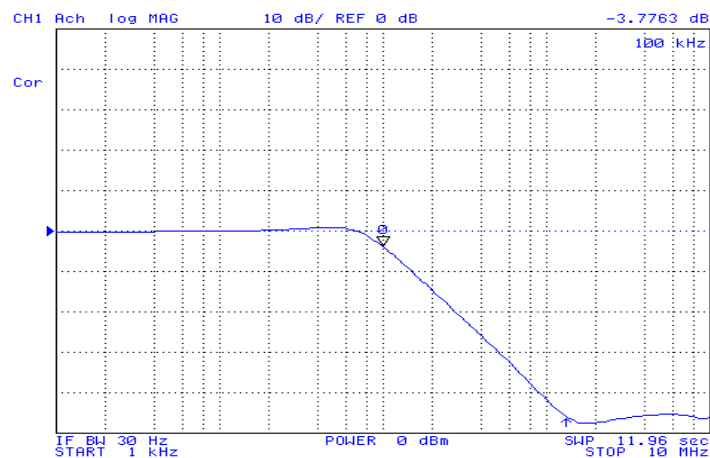
## Příloha C - Originální výsledky měření získané z obvodového analyzátoru 4395 A



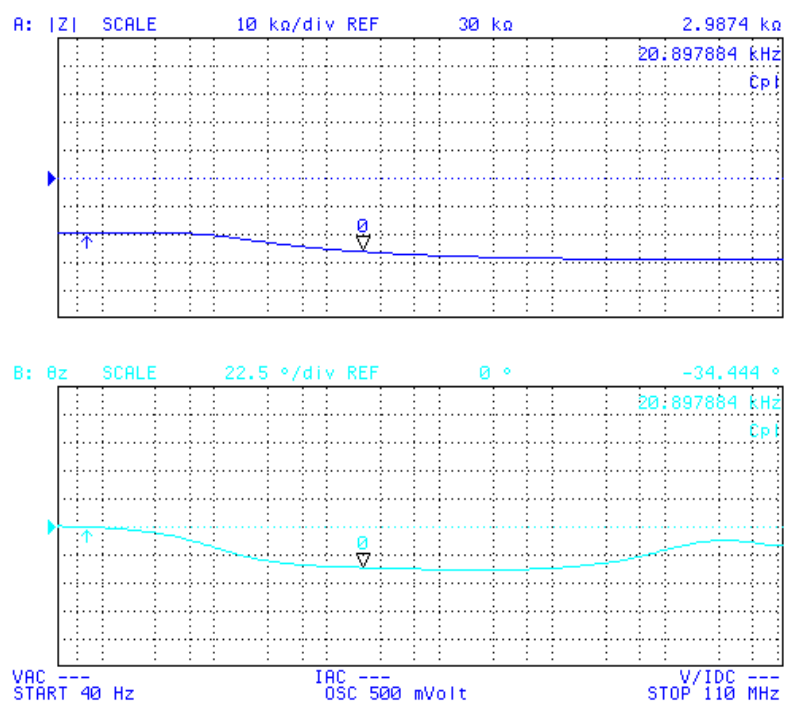
Obr. 36: Originální výsledek pseudo-diferenční filtr fraktální řád pro  $\alpha = 0.4$



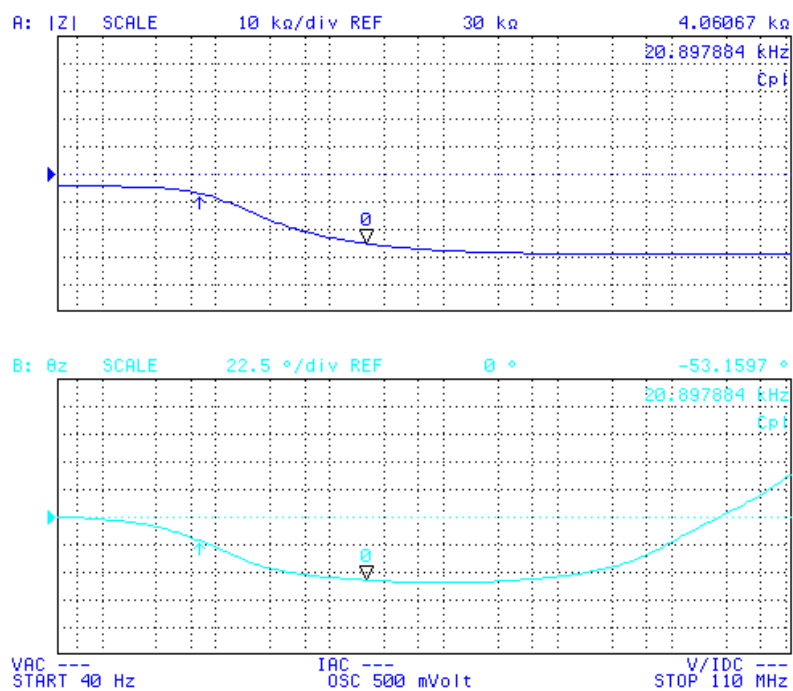
Obr. 37: Originální výsledek pseudo-diferenční filtr fraktální řád pro  $\alpha = 0.6$



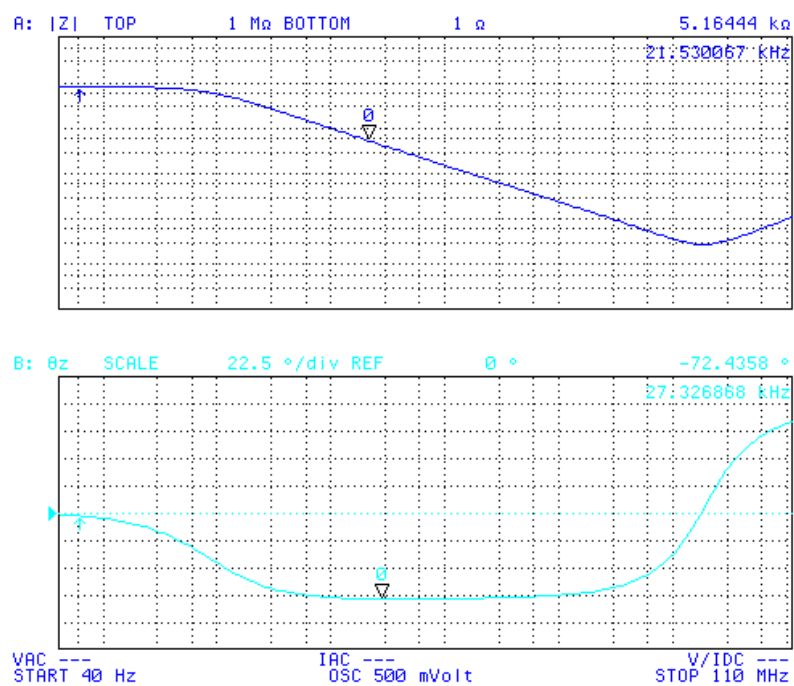
Obr. 38: Originální výsledek pseudo-diferenční filtr fraktální řád pro  $\alpha = 0.8$



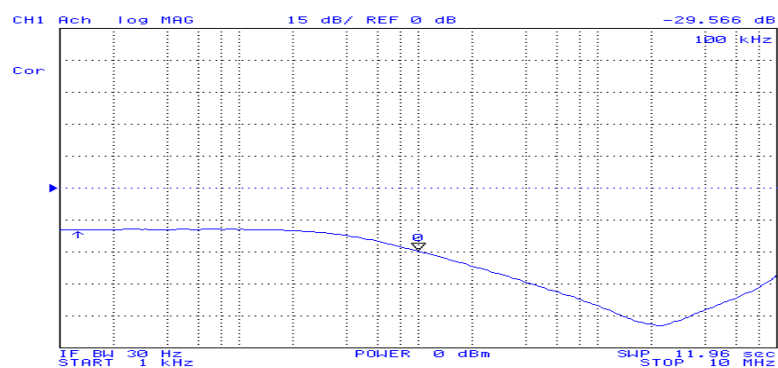
Obr. 39: Originální výsledek pseudo-kapacitance ( $C_\alpha$ ) pro  $\alpha = 0.4$



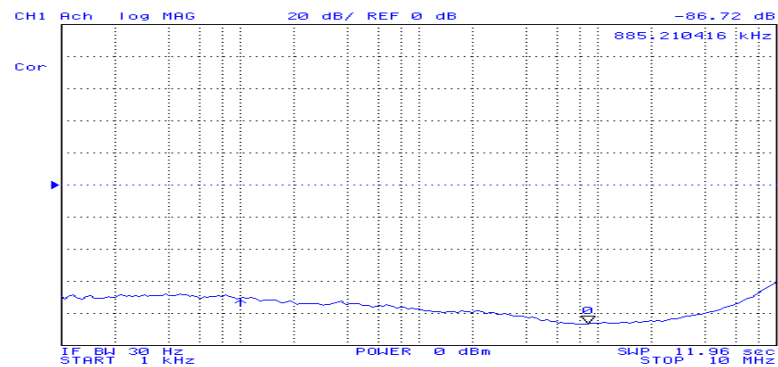
Obr. 40: Originální výsledek pseudo-kapacitance ( $C_\alpha$ ) pro  $\alpha = 0.6$



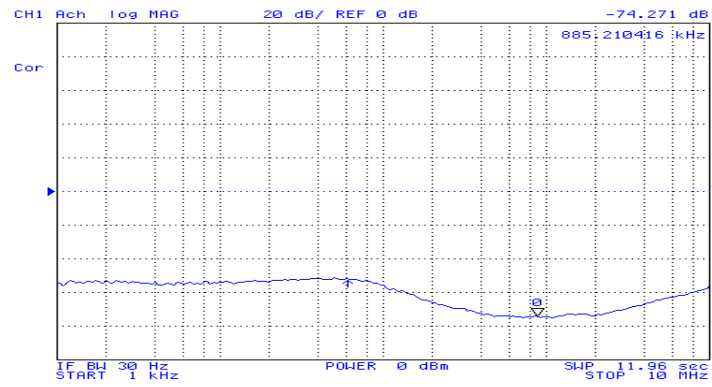
Obr. 41: Originální výsledek pseudo-kapacitance ( $C_\alpha$ ) pro  $\alpha = 0.8$



Obr. 42: Originální výsledek CMRR pro  $\alpha = 0.4$  při napájecí napětí 1.65 V



Obr. 43: Originální výsledek CMRR pro  $\alpha = 0.6$  při napájecí napětí 1.65 V



Obr. 44: Originální výsledek CMRR pro  $\alpha = 0.8$  při napájecí napětí 1.65 V